

39
2 es.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA



"DISEÑO Y CARACTERIZACION DE UNA MAQUINA LAPEADORA, CON EL PLATO ACOPLADO A UN COJINETE NEUMATICO"

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
(AREA MECANICA-DISEÑO)

PRESENTA:
CARLOS DE J. CAVA RUÍZ

DIRECTOR DE TESIS:
M.I. GABRIEL ASCANIO GASCA

Ciudad Universitaria, México D.F.

1998

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

260021



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas

Tesis Digitales

Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

El presente trabajo fue desarrollado en el Departamento de Diseño Mecánico y Fabricación de Prototipos del Centro de Instrumentos de la UNAM, bajo la tutoría del M.I. Gabriel Ascanio Gasca, y con la asesoría del Dr. Ricardo Chicurel.

A mi madre María Teresa

*a quien debo lo que soy, dedico este trabajo
como una pequeña manera de recompensar
el invaluable esfuerzo que ha realizado en mi
formación, siempre regalándome su cariño
infinito, su confianza y comprensión.*

A mi padre Carlos

A mi hermano Pablo

A mis tíos Rosa María y Samuel

*A mis primos Verónica, Claudia,
Rosario, Cecilia y Samuel*

A mis amigos

Agradecimientos

En primer lugar, deseo agradecer al M.I. Gabriel Ascanio por haberme brindado su apoyo en todos los aspectos y su gran amistad durante estos últimos años.

Al Dr. Ricardo Chicurel por su interés mostrado en el desarrollo de este proyecto.

Al personal del taller de Diseño Mecánico del Centro de Instrumentos. En especial al Sr. Juan García por su participación en la manufactura de la mayor parte de las piezas de la máquina y por sus consejos. A todos los demás que contribuyeron: Juan Arenas, Alejandro Pérez, Valentín López y Gabriel Romero, agradeciendo a todos los conocimientos de mecánica aportados de su experiencia.

A mis compañeros de Diseño Mecánico: Selene, Arcelia, Alberto, Abdul y Leopoldo, por la amistad que nos unió al trabajar juntos.

Al Sr. Luis Velázquez por su apoyo en la producción de planos y a los demás miembros del Depto. de Dibujo del CI por el apoyo técnico recibido.

Al Dr. José Saniger y al I.Q. José O. Flores, del Depto. de Química del CI, por el préstamo de equipo, por su asesoría y consejos. Y en especial, un agradecimiento al Fís. José G. Bañuelos por su trabajo y tiempo cedido para visualizar muestras en el microscopio atómico.

Al Ing. Rigoberto Nava y al Ing. Sergio Padilla, del Depto. de Metrología del CI, por el préstamo de equipo y su asesoría para utilizarlos.

Al Dis. Humberto Albornoz por su desinteresada contribución en la sesión fotográfica del equipo.

A los miembros del honorable jurado: Dr. Ricardo Chicurel U., Dr. Marcelo López Parra, M. I. Leopoldo González G., Ing. Adrián Espinosa B. y M. I. Gabriel Ascanio G. por sus aportaciones y comentarios.

Un agradecimiento muy especial a todos mis maestros y a todas aquellas personas que me proporcionaron las herramientas necesarias para poder desarrollarme profesionalmente. En especial, quiero agradecer a la Sra. Carmen Reyes el apoyo que he recibido durante mi carrera pero sobre todo por su amistad.

A la Facultad de Ingeniería y a la Universidad Nacional Autónoma de México por todo lo que he recibido en estos años.

INDICE GENERAL

INDICE GENERAL	i
INDICE DE FIGURAS	iv
NOMENCLATURA	vii
INTRODUCCION	1
CAPITULO 1 GENERALIDADES DEL PROCESO DE LAPEADO	4
1.1 PROCESOS ABRASIVOS	4
1.1.1 Maquinado por medios abrasivos	4
1.1.2 Acabado por abrasivos	5
1.2 PROCESO DE LAPEADO	7
1.2.1 Definición	7
1.2.2 Antecedentes históricos	7
1.2.3 Propósitos del lapeado	9
1.2.4 Criterios de la clasificación del lapeado	10
1.2.5 Mecanización para el lapeado de superficies planas	11
1.2.6 Mecanismo del lapeado	14
1.2.7 Cinemática del lapeado	16
1.2.8 Capacidad del proceso de lapeado	18
1.2.9 Tolerancias obtenibles en superficies lapeadas	20
1.2.10 Ejemplos de piezas lapeadas y sus aplicaciones	22

CAPITULO 2	PARAMETROS DEL PROCESO DE LAPEADO	25
2.1	IDENTIFICACION DE LOS PARÁMETROS DEL LAPEADO	25
2.1.1	Irregularidades de la superficie	26
2.1.2	Remoción de material	27
2.2	CARACTERÍSTICAS DEL PLATO DE LAPEADO	28
2.3	PREPARACIÓN DE LA PIEZA DE TRABAJO	30
2.4	SELECCIÓN DE LA MEZCLA ABRASIVA	31
2.4.1	Selección del abrasivo	32
2.4.2	Selección del vehículo	33
2.4.3	Efecto de la concentración de una mezcla abrasiva	35
2.4.4	Dosificación de la mezcla abrasiva	38
2.5	EFFECTO DE LA PRESIÓN	39
2.6	EFFECTO DEL TAMAÑO DEL GRANO ABRASIVO	42
2.7	EFFECTO DEL TIEMPO DE LAPEADO	44
2.8	VELOCIDAD DE LAPEADO	48
2.9	INFLUENCIA DE LAS VIBRACIONES EN EL LAPEADO	49
2.10	LIMPIEZA DEL AMBIENTE	50
CAPITULO 3	DISEÑO DE UNA LAPEADORA CON LA APLICACIÓN DE UN COJINETE NEUMÁTICO	51
3.1	DESCRIPCIÓN GENERAL DEL EQUIPO PROPUESTO	51
3.2	ESTRUCTURA DE LA MAQUINA	52
3.3	DISEÑO DEL PLATO DE LAPEADO	55
3.4	ELEMENTOS AUXILIARES PARA EL ACONDICIONAMIENTO DE LAS PIEZAS	58
3.4.1	Discos de presión	58
3.4.2	Portapiezas	60

3.5	MECANISMOS DE POSICIONAMIENTO DE LOS PORTAPIEZAS	61
3.6	COJINETE NEUMATICO	63
3.7	SELECCION DEL MOTOR	71
3.8	ACOPLAMIENTO DEL SISTEMA MOTRIZ	71
3.9	AUTOMATIZACION DE LA "MALCON"	73
CAPITULO 4 CARACTERIZACION DE LA "MALCON"		75
4.1	CLASIFICACIÓN DE PRUEBAS	75
4.2	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL COJINETE NEUMATICO	76
4.3	PRUEBAS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS PARAMETROS DE LAPEADO	79
4.3.1	Desarrollo de las pruebas	84
4.3.2	Resultados de la remoción de material	85
4.3.3	Resultados de la rugosidad de la superficie	87
4.3.4	Interrelación entre los resultados de remoción de material y los de la rugosidad de la superficie.	92
4.4	PRUEBAS PARA VALORAR LA INFLUENCIA DEL COJINETE NEUMATICO EN EL PROCESO DE LAPEADO.	95
4.4.1	Prueba para comparar la rugosidad de la superficie	97
4.4.2	Aplicación de pruebas para comparar la planicidad	99
4.5	Instrumentación utilizada en las pruebas	100
CONCLUSIONES		102
APENDICE A		105
APENDICE B		109
REFERENCIAS		116

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Máquinas lapeadoras para diferentes geometrías	8
Figura 1.2	Lapeado de una pieza en forma manual	11
Figura 1.3	Máquinas para lapear simultáneamente dos superficies planas	12
Figura 1.4	Lapeadoras para una cara plana y con portapiezas en forma de anillo	13
Figura 1.5	Esquema representativo del mecanismo del proceso de lapeado	15
Figura 1.6	Representación de la superficie de una pieza, antes y después de ser lapeada	16
Figura 1.7	Trayectorias de giro del plato y el portapiezas	17
Figura 1.8	Ejemplos de piezas lapeadas	23
Figura 2.1	Irregularidades de una superficie	27
Figura 2.2	Efectos indeseables en el lapeado de una pieza como consecuencia de una mala preparación de ésta	31
Figura 2.3	Efecto del grado de concentración de la mezcla abrasiva y la presión sobre la remoción de material; para un tamaño de grano constante	36
Figura 2.4	Efecto del grado de concentración y la presión sobre la razón de remoción de material, para dos casos particulares	37
Figura 2.5	Efecto de los períodos de alimentación de la mezcla abrasiva sobre la cantidad de material removido	39
Figura 2.6	Efecto de presión sobre la calidad superficial y la razón volumétrica de remoción de material	40

Figura 2.7	Comportamiento de la presión y la remoción de material bajo condiciones normales, para un caso particular	41
Figura 2.8	Influencia del tamaño característico del grano abrasivo sobre la remoción de material y el promedio de las irregularidades de la superficie	43
Figura 2.9	Relación entre la remoción de metal, el promedio de las alturas de las irregularidades superficiales, el número efectivo de grano y el tiempo de lapeado	45
Figura 2.10	Efecto del tiempo de lapeado sobre la pérdida lineal de dimensiones y la calidad superficial	46
Figura 2.11	Efecto del tiempo de lapeado sobre la pérdida lineal de dimensiones y la calidad superficial, considerando la adición periódica de la mezcla abrasiva	47
Figura 2.12	Efecto de la velocidad de lapeado sobre la pérdida lineal de dimensiones y la calidad superficial	48
Figura 3.1	Estructura de la "MALCON"	53
Figura 3.2	Esquema del prototipo de la "MALCON"	55
Figura 3.3	Elementos de los discos de presión	59
Figura 3.4	Portapiezas de la "MALCON"	61
Figura 3.5	Mecanismo-guía del portapiezas	62
Figura 3.6	Vista del elemento dinámico del cojinete neumático de la "MALCON"	65
Figura 3.7	Vista de la parte estática del cojinete neumático de la "MALCON"	68
Figura 3.8	Diagrama y dimensiones de los elementos del cojinete neumático de la "MALCON"	69
Figura 3.9	Area de trabajo de la "MALCON"	72
Figura 3.10	Máquina Lapeadora con la aplicación de un Cojinete Neumático	73

Figura 4.1	Arreglo para la prueba de colchón de aire mínimo en el cojinete neumático de la "MALCON"	77
Figura 4.2	Prueba para determinar la carga máxima que puede soportar el cojinete neumático de la "MALCON"	78
Figura 4.3	Características superficiales de una probeta de acero 1045 templada, revenida y rectificada	80
Figura 4.4	Efecto de la variación de presión y del tiempo de lapeado sobre la remoción de material, para alúmina de 5 μm	85
Figura 4.5	Efecto de la variación de presión y del tiempo de lapeado sobre la remoción de material, para alúmina de 1 μm	86
Figura 4.6	Comportamiento de la presión y el tiempo de lapeado sobre la calidad superficial de la pieza, para alúmina de 5 μm	88
Figura 4.7	Comparación visual entre dos superficies lapeadas con abrasivo de 5 μm y por un tiempo de 120 min, bajo presiones distintas	89
Figura 4.8	Relación entre la presión y la calidad superficial de la pieza, para diferentes tiempos de lapeado, para alúmina de 1 μm	90
Figura 4.9	Piezas lapeadas con abrasivo de 1 μm en las cuales todavía es notable las marcas del rectificado	91
Figura 4.10	Aspecto visual de una superficie en distintas etapas: rectificada, lapeada con abrasivo de 5 μm y con 1 μm	95
Figura 4.11	Imágenes del sistema de acoplamiento rígido de la "MALCON"	96
Figura 4.12	Probeta y su disco de ajuste empleados en las pruebas para valorar la influencia del cojinete neumático sobre el lapeado	97

NOMENCLATURA

a	Tamaño del grano abrasivo	$[\mu\text{m}]$
A	Area	$[\text{cm}^2]$
A_{ct}	Area de contacto entre la pieza y el plato	$[\text{cm}^2]$
e	Espesor	$[\text{m}]$
h	Altura	$[\text{m}]$
H_{RB}	Dureza Rockwell B	$[H_{RB}]$
H_{RC}	Dureza Rockwell C	$[H_{RC}]$
H_V	Dureza superficial Vickers	$[H_V]$
I	Momento de inercia	$[\text{kgm}^2]$
k^2	Radio de giro	$[\text{m}^2]$
l_o	Longitud de muestreo	$[\text{mm}]$
L	Pérdida lineal de dimensiones	$[\mu\text{m}]$
m	Masa	$[\text{kg}]$
m	Grado de concentración de la mezcla abrasiva	$[\%]$
N	Revoluciones por minuto	$[\text{rpm}]$
p	Presión de lapeado	$[\text{kg}/\text{cm}^2]$
P	Presión	$[\text{kg}/\text{m}^2]$
Pot	Potencia	$[\text{W}]$
Q	Remoción de material	$[\text{mg}]$
Q_g	Razón del peso de material que se remueve por unidad de tiempo	$[\text{mg}/\text{min}]$
Q_v	Razón del volumen de material desprendido por unidad de tiempo	$[\text{mm}^3/\text{min}]$

r	Radio	[m]
R_a (R_{mav})	Media aritmética de los valores de los alejamientos de un perfil de rugosidad	[μm]
R_y	Distancia entre el pico más alto y el valle más bajo de un perfil de rugosidad	[μm]
R_m (R_z)	Promedio de las alturas de las irregularidades de la superficie	[μm]
T	Período de dosificación de la mezcla abrasiva	[s]
v	Velocidad de lapedo	[m/s]
V	Volumen	[m ³]
W	Peso	[N]
ϕ	Diámetro	[mm]
θ	Aceleración angular	[rad/s ²]
ρ	Densidad	[kg/m ³]
τ	Tiempo de laprado	[s]
ω	Velocidad angular	[rad/s]
T	Torque o par de torsión	[kg·m]

Subíndices

a	abrasivo
b	rodillo del mecanismo guía
cn	cojinete neumático
cr	portapiezas
dp	discos de presión
e	exterior
i	interior
l	plato de laprado
w	pieza de trabajo

INTRODUCCION

En diversas áreas de la Ingeniería Mecánica, en concreto a las que se refieren al acondicionamiento de materiales y la manufactura de piezas que requieren de una alta precisión, el proceso de lapeado es utilizado para el acabado superficial de piezas con distintas geometrías y con aplicaciones muy diversas. En el mercado existen un gran número de máquinas que realizan específicamente este trabajo, conocidas como lapeadoras, variando entre sí por la geometría de la superficie a la que se desea dar acabado, por su capacidad de producción y grado de automatización.

Con base en la investigación bibliográfica realizada sobre el proceso de lapeado y la búsqueda de información comercial previa, se observó que estas máquinas presentan un acoplamiento rígido entre el pulidor (plato de lapeado) y el sistema de potencia, por lo que al no encontrar antecedentes que indicaran lo contrario, se propuso el desarrollo de un prototipo de una lapeadora para trabajar superficies planas que tuviese un acoplamiento flexible entre los elementos mencionados. Para tal efecto, se incorporó un cojinete neumático en el diseño, el cual soporta al plato

de lapeado. Los propósitos principales de esto son los siguientes: reducir las vibraciones y asegurar la alineación del plato durante el proceso de acondicionamiento, lo cual daría como resultado la obtención de un plano horizontal de trabajo que posibilite una mejora en la calidad del acabado de la superficie de la pieza de trabajo, desde un punto de vista dimensional y geométrico.

En el primer capítulo de la tesis que se presenta, se hace una recopilación de la investigación bibliográfica realizada sobre el proceso de lapeado. De este modo, con la información expuesta se pretende cumplir con los siguientes objetivos: el primero es dar a conocer al lector los aspectos generales que están relacionados con tal proceso; y el segundo fin, consiste en establecer las bases bajo las cuales se estudió, se propuso y desarrolló el diseño de la máquina lapeadora propuesta.

En el capítulo siguiente se describe cuáles son y cómo actúan los principales parámetros involucrados en un proceso de lapeado. Por tanto, el objetivo de este capítulo es evaluar el comportamiento de los principales parámetros del lapeado, dando lugar a las bases teóricas que permitan definir la caracterización del prototipo que se presenta.

En el tercer capítulo se hace una descripción de las condiciones y características del diseño que dan como resultado al prototipo de la máquina lapeadora en cuestión, vistos desde un punto global, así como se presenta una descripción más detallada de los principales elementos y sistemas que componen a dicha máquina.

En el último capítulo se presenta la forma mediante la cual se caracterizó el comportamiento del prototipo, desde un punto de vista experimental. Por lo tanto, el contenido de este capítulo abarca desde la descripción del diseño de las pruebas para analizar el comportamiento de los parámetros de lapeado en la máquina propuesta, hasta la discusión de los resultados obtenidos de dichas pruebas. Por tanto, se considera que este capítulo es el de mayor importancia, ya que en éste se expondrán los alcances logrados con el desarrollo de la máquina propuesta.

CAPITULO 1

GENERALIDADES DEL PROCESO DE LAPEADO

1.1 PROCESOS ABRASIVOS

En la Ingeniería Mecánica se designa como *procesos de corte* a aquéllos en los que se remueve o se desgasta material de una pieza, para darle forma, dimensiones y otras características, con el fin de hacer funcional a la pieza maquinada. Los procesos de corte se diferencian entre sí por diversos factores, tales como: las características geométricas de la pieza por maquinar, la herramienta de corte, la cantidad de material a remover, el modo de cortar, etc. Dentro de los procesos de corte se encuentran aquéllos en los que se emplean materiales abrasivos para remover el material y los cuales se pueden dividir en procesos de maquinado y de acabado.

1.1.1 Maquinado por medio de abrasivos

El *maquinado por abrasivos* se refiere a una operación primaria de corte o arranque de material, en el cual generalmente se emplean ruedas rotatorias de material abrasivo aglomerado (muelas). Los abrasivos revestidos están constituidos por tres

elementos: el grano abrasivo, el respaldo y el aglutinante, los cuales constituyen los tres elementos esenciales de los procesos de corte: la herramienta, el portaherramienta y el medio de sujeción entre estos, respectivamente.

Las principales características del maquinado con abrasivos es el realizar cortes con profundidades de hasta 12.5 mm en un lapso de tiempo corto, permitiendo obtener un buen acabado superficial y con un control estricto de la dimensión [1]. Por lo anterior, resulta económicamente efectivo para piezas fundidas, forjadas y de gran diversidad de geometrías, lo cual hace que el maquinado con abrasivos sea una operación económicamente competitiva contra otros procesos convencionales de corte. Un ejemplo de maquinado por abrasivos es el esmerilado por alta energía.

Mecánicamente las máquinas por abrasión, a diferencia de otras máquinas-herramientas, no requieren de medios de sujeción complejos y son relativamente más sencillos de automatizar.

1.1.2 Acabado por abrasivos

El *acabado por abrasivos* es una operación complementaria en la fabricación de piezas, por el cual se pretende obtener un buen acabado superficial o dimensional; en otras palabras, su finalidad está enfocada a modificar únicamente las características de la superficie de trabajo.

Debe mencionarse que en algunas bibliografías no hay una diferenciación explícita entre el maquinado y el acabado por abrasivos, por lo que este último es catalogado como un proceso de maquinado (p.e., en la definición de "Procesos de maquinado" dada en la referencia [6]). Por tal motivo, tomando como referencia la división que hace Amstead [1] entre estos dos conceptos, se mencionan a continuación algunos puntos comparativos entre el maquinado y el acabado por

abrasivos con el fin de reforzar la individualidad de este último. Tales puntos son los siguientes:

- A diferencia del maquinado por abrasivos que puede proporcionar un desprendimiento de material más ventajoso respecto de otros procesos de corte, en el acabado por abrasivos, el desprendimiento o desgaste de material resulta ser mínimo.
- En el acabado por abrasivos generalmente se emplean abrasivos sueltos que son disueltos en un medio.
- Hablando en términos económicos, a diferencia del maquinado por abrasivos, el acabado por abrasivos resulta ser muy caro. Esto se observa en la diferencia de costos de diversos factores que están involucrados en un proceso, como son los siguientes: el costo de los dispositivos y de los materiales empleados en el trabajo de la pieza, el tiempo real unitario del proceso (el cual está determinado por la suma de otros tiempos, sobresaliendo el tiempo que se tarda en cortar o desprender el material requerido).

Dentro de los procesos de acabado por abrasión se encuentran específicamente los siguientes procesos: el bruñido (honing), el rectificado (grinding), el lapeado (lapping), el superacabado (superfinishing) y otros de carácter más especial, como es el maquinado puntual por medio de diamantes (single-point diamond machining). Estos procesos se han citado en un orden creciente, de acuerdo a la exactitud que ofrecen en el acabado superficial de una pieza.

Debido a la gran cantidad de información que representaría la descripción de cada uno de los procesos mencionados y para evitar desviaciones del objetivo que se pretende con esta tesis, se expondrá únicamente la información concerniente al proceso de lapeado tratando de presentar los aspectos más relevantes y que son de utilidad.

1.2 PROCESO DE LAPEADO

1.2.1 Definición

En la bibliografía que trata el tema sobre el proceso de lapeado, se puede observar que éste ha sido definido en distintas formas. A continuación se propone una definición que trata de englobar las ideas de los diversos autores [1, 3, 4, 7, 9, 19], con el fin de proporcionar al lector una idea más completa de qué es el "proceso de lapeado".

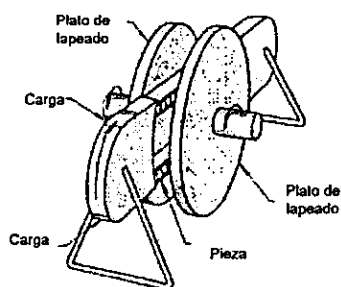
El lapeado (lapping en inglés) es un proceso de acabado superficial que consiste en una acción de abrasión realizada por el frotamiento de una pieza contra un pulidor llamado "plato de lapeado", empleándose generalmente para tal efecto abrasivos sueltos que son cargados sobre el plato y desplazados continuamente en un patrón aleatorio entre la superficie de la pieza y del plato; caracterizándose paralelamente, por ser un proceso efectuado a una baja velocidad y una presión ligeramente aplicada.

1.2.2 Antecedentes históricos

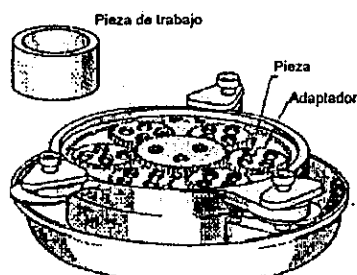
El lapeado es uno de los procesos abrasivos más antiguamente conocidos y aplicados. Las técnicas y métodos que atañen al lapeado han evolucionado desde conformar una operación totalmente manual (artesanal) a las formas actuales en que se realiza el lapeado, las cuales a su vez pueden diversificarse desde una operación aún manual hasta una completamente automática [4, 7]. A diferencia del pasado, en el cual el lapeado quizá surgió como un medio para mejorar el aspecto superficial de una pieza por un motivo puramente estético (pulimento de joyas), hoy en día el lapeado es considerado principalmente como una operación final en la manufactura de una pieza, con el objeto de darle propiedades funcionales

específicas a la superficie de ésta, bajo el cumplimiento de requerimientos ingenieriles claramente establecidos.

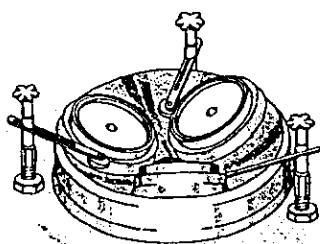
Esta evolución originó que en las últimas décadas se hayan desarrollado un gran número de máquinas para lapear, las cuales se conocen como *lapeadoras* (*lapping-machines*). En la figura 1.1 se pueden observar diversos tipos de máquinas lapeadoras.



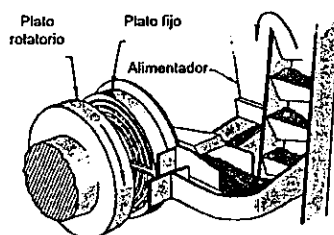
(a) Lapeadora para piezas cilíndricas de acero endurecido



(b) Lapeadora con sistema planetario para dar acabado a anillos



(c) Lapeadora multi-piezas para superficies esféricas



(d) Lapeadora de ranuras múltiples usada para el lapeado de bolas de rodamiento

Fig. 1.1 Máquinas lapeadoras para diferentes geometrías.

Actualmente existen industrias de diversos ramos que utilizan lapeadoras que les permite lapear automáticamente altos volúmenes de producción. Esto se puede

confirmar, de acuerdo con datos publicados [3], con la existencia en el mercado de máquinas lapeadoras que tienen la capacidad de dar acabado hasta 1000 piezas cilíndricas por hora o hasta 2000 piezas de superficie plana por hora.

1.2.3 Propósitos del lapeado

Con base en las diversas fuentes bibliográficas [1, 3, 4, 19], se observa que éstas coinciden en señalar que el proceso de lapeado tiene cuatro objetivos principales:

1. Producción de piezas geométricamente exactas.

Lo cual se entiende como la capacidad de corregir la menor imperfección en la forma (conformación y tamaño) de una pieza, satisfaciendo las tolerancias de forma relacionadas con las características individuales de una pieza, como son: rectitud, planicidad, circularidad, cilindridad.

2. Aseguramiento de una superficie de alta calidad.

Esto se refiere al refinamiento en el acabado superficial de la pieza, cumpliendo con las desviaciones permisibles que están relacionadas con la rugosidad (textura) de la superficie. En otras palabras, se entiende como la obtención de una superficie pulida muy alisada.

3. Corrección de las mínimas imperfecciones superficiales.

Se comprende como la acción de corregir o remover daños y/o subcapas superficiales de una pieza, que degradan sus propiedades eléctricas y ópticas.

4. Proporcionar un ajuste extremadamente reducido entre dos superficies de contacto.

Bajo este concepto se da a entender el acabado que se da a dos piezas que ensamblan entre sí por medio de un plano común, obteniéndose una tolerancia cerrada de paralelismo entre las dos caras lapeadas.

Sea cual fuere el propósito de utilizar el proceso de lapeado en la producción de una pieza, en todos los casos se debe considerar como una etapa final en un proceso de manufactura, con el fin de brindar los refinamientos que no son logrados por otros medios de maquinado.

1.2.4 Criterios de la clasificación del lapeado

El proceso de lapeado ha sido clasificado a partir de diversos puntos de vista. A continuación se presentan los más importantes:

- *Forma de la superficie de la pieza de trabajo* [3, 7]. El lapeado puede ser de tipo rotatorio para superficies de revolución, o lapeado plano para el acabado de superficies planas.
- *Grado de mecanización* [7]. Desde este punto de vista, se tiene que existe el lapeado de tipo manual (*hand lapping*), el semiautomático y el automático. Los dos últimos se caracterizan por ser realizados por medio de máquinas herramientas. En las lapeadoras totalmente automáticas se incluye la adición de sistemas mecánicos que regulan la aplicación de presión y el movimiento, así como de otros instrumentos que controlan y monitorean el acabado de una pieza durante el proceso. En la figura 1.2 se puede observar el lapeado de una pieza en forma manual.
- *Proceso de maquinado* [3, 7]. Esta clasificación se refiere a la forma en que se trabaja la pieza, existiendo dos alternativas: el lapeado mecánico y el químico-mecánico. Este último involucra el uso de líquidos activos en el acabado superficial de la pieza.



Fig. 1.2 Lapeado de una pieza en forma manual.

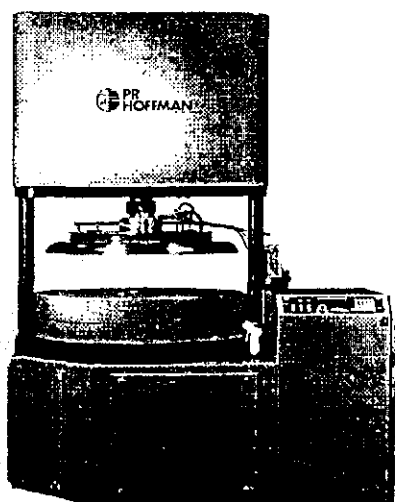
- *Aplicación de una mezcla abrasiva (abrasivo:vehículo)* [19]. Existe la posibilidad de lapear empleando una mezcla abrasiva (compuesta por un abrasivo disuelto en un vehículo) o de utilizar solamente abrasivo. Lo anterior se conoce técnicamente como lapeado húmedo y lapeado en seco, siendo que el primero está relacionado con un mayor desprendimiento ("desbaste") de material y el segundo para el afinado de la pieza.

1.2.5 Mecanización para el lapeado de superficies planas

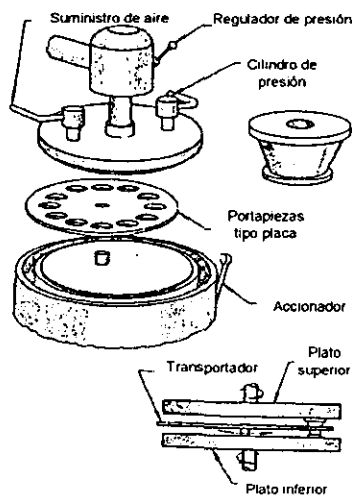
En el lapeado de superficies planas, en comparación con el lapeado para otros tipos de geometría, es muy común encontrar que éste puede ser realizado en forma manual o mecánica. Para efectuar el lapeado mecánico de superficies planas existen en el mercado dos tipos de máquinas, siendo éstas:

a) Máquinas lapeadoras para dos caras (Dual-face lapping machine). Estas máquinas se caracterizan por tener dos platos, uno que es giratorio y está por debajo de la pieza y otro fijo que proporciona la presión necesaria al estar colocado

sobre la pieza que a la vez está libre, por lo que la superficie inferior y la cara superior de la pieza son lapeadas simultáneamente. Se puede observar que el mecanismo de la mayoría de estas máquinas es del tipo que se conoce como planetario, en el cual los portapiezas se les hace mover por medio de engranes (Ver fig. 1.3a); sin embargo, también hay otros mecanismos que no involucran la presencia de engranajes (Ver fig. 1.3b). Los portapiezas que se utilizan en estos tipos de máquinas, normalmente son del tipo de placa o transportadores (*carriers*). En la mayoría de las aplicaciones del lapeado de superficies planas se prefiere utilizar comúnmente a este tipo de máquinas.



(a) Lapeadora planetaria con dos platos.



(b) Lapeadora para superficies paralelas.

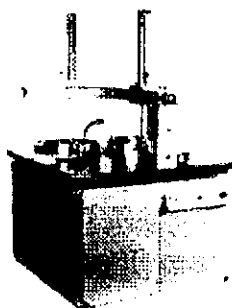
Fig. 1.3 Máquinas para lapear simultáneamente dos superficies planas.

b) *Máquinas lapeadoras para una cara (Single-face lapping machine).* Estas máquinas tienen un plato rotatorio horizontal, y usualmente cuentan con tres o cuatro portapiezas en forma de anillo (*conditioning rings*) que están colocados sobre

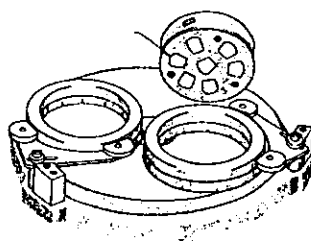
la superficie del plato, pero que por medio de un mecanismo guía se les permite rotar libremente (Ver fig. 1.4). Estas máquinas son aplicadas principalmente para el lapeado de una sola superficie de la pieza, sin embargo con ellas se pueden obtener superficies paralelas en una misma pieza.



(a) Lapeadora para superficies planas con tres portapiezas tipo anillo.



(b) Lapeadora para superficies planas con tres anillos y sistema automático para regular la de presión.



(c) Lapeadora con dos portapiezas del tipo de anillo.

Fig. 1.4 Máquinas lapeadoras para una cara plana y con portapiezas en forma de anillo.

1.2.6 Mecanismo del proceso

Como se estableció con anterioridad, el lapeado es un proceso de desgaste (baja remoción) de material. Debe indicarse que en éste se presenta la interacción entre tres elementos básicos [14], los cuales son: la superficie del pulidor o plato de lapeado, el medio abrasivo y la superficie de la pieza por trabajar.

Por otro lado, existen tres propiedades que determinan que el mecanismo de lapeado pueda ser llevado a cabo, las cuales se presentan a continuación:

a) La selección correcta de los elementos, tomando en cuenta la dureza del material correspondiente a cada uno. Esto se debe a que en el lapeado, el material removido es el que proviene de la superficie más dura de los dos elementos. Lo anterior, da lugar a la regla principal del lapeado: *"el plato de lapeado debe ser más suave que la pieza de trabajo"* [19].

b) El aseguramiento del contacto constante de la superficie de la pieza con la del plato, que se obtiene al aplicar una presión (p). La aplicación de ésta puede ser sobre la pieza por trabajar o sobre el pulidor, dependiendo de las características particulares de la máquina. En el caso de la lapeadora que se exhibe en la presente tesis, en la práctica se emplean dispositivos conocidos como "discos de presión" que se colocan sobre la pieza, de los cuales se hablará posteriormente (Capítulo 3).

c) La cinemática del proceso que está caracterizada por la presencia de movimientos de tipo relativo entre los diferentes elementos que están involucrados.

En la figura 1.5 se presenta, en una forma esquemática, la interacción simplificada entre los tres elementos principales que intervienen en el lapeado.

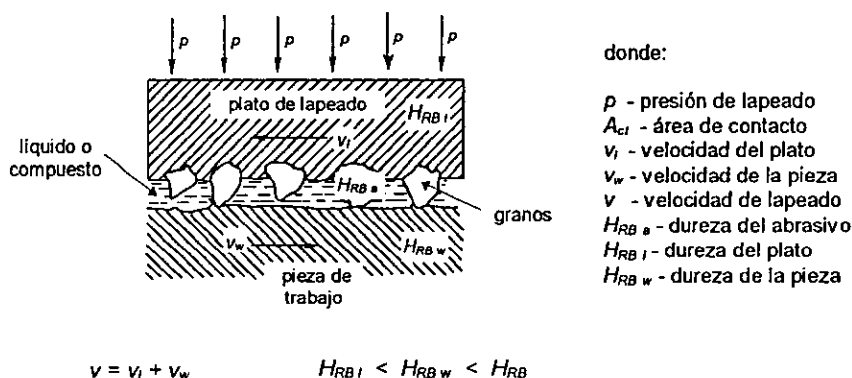


Fig. 1.5 Esquema representativo del mecanismo del proceso de lapeado.

Considerando lo que hasta ahora se ha dicho, a continuación se describe con más detalle cómo se efectúa el mecanismo general del lapeado:

Partiendo de utilizar un plato más suave (o muy poroso) junto con la presión que ejerce la pieza sobre la superficie del plato y el movimiento de un elemento respecto del otro; los granos de abrasivo colocados sobre la superficie del plato se fragmentan hacia su interior en un tamaño inerte (consumiéndose así el poder de abrasión de los granos), por lo que se incrustan temporalmente en la superficie del pulidor efectuando la acción de abrasión (o el mayor desgaste) sobre la superficie más dura [19], es decir, removiendo la cantidad de metal deseada en la pieza de trabajo [4]. En otras palabras, las partículas de abrasivo cumplen con la función de puntos cortantes en miniatura, encontrándose sujetos por el plato de lapeado, el cual realiza el papel de soporte o de portaherramienta.

En adición a la fragmentación de los granos y del incrustamiento de éstos en la superficie del plato; el movimiento del plato a través de la pieza produce un

rodamiento y deslizamiento de las partículas abrasivas (afiladas y anguladas), lo cual se refleja en una acción cortante adicional en la superficie de la pieza [9].

De lo anterior, las irregularidades (picos) de la superficie son removidas por el constante contacto por rozamiento, hasta obtener la geometría, dimensiones y acabado superficial preestablecidos [4]. En la figura 1.6 se muestra esquemáticamente las características superficiales de una pieza, antes y después de ser lapeada.

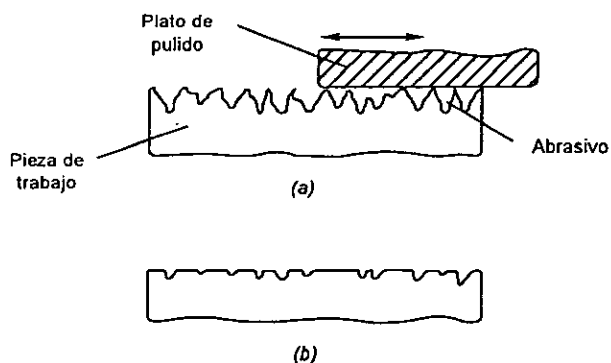


Fig. 1.6 Representación de la superficie de la pieza antes de ser lapeada (a), y una vez que fue procesada (b).

1.2.7 Cinemática del lapeado

La cinemática del proceso de lapeado se caracteriza por la presencia de un movimiento relativo (*multimotion*) entre la pieza y el plato de lapeado, obteniéndose un movimiento giratorio y otro de translación circular. A continuación se describe la forma en que se obtiene tal movimiento, haciendo únicamente referencia a las máquinas lapeadoras para superficies planas con portapiezas en forma de anillo.

Desde un punto de vista mecánico, para concebir tal tipo de movimiento, se requiere de dos ejes de giro independientes: el primero es el eje principal de la máquina, alrededor del cual gira el plato de lapeado; el segundo es un eje auxiliar correspondiente a un portapiezas. Así se tiene que la pieza por trabajar debe de estar colocada en el interior de un portapiezas, el cual a su vez está colocado sobre el plato y mantiene una misma posición de su eje respecto al eje principal por medio de un mecanismo guía. Debido al giro del plato (ω_l), el portapiezas recibe un impulso que tiende a hacerlo rotar alrededor del plato; pero debido a la acción del mecanismo guía (ω_g), ese movimiento se traduce en un giro del portapiezas (ω_{cr}) alrededor de su propio eje (en el mismo sentido que gira el plato). Sumando el movimiento del plato y del portapiezas, se logra que la pieza esté en contacto con toda la superficie del pulidor y tenga una trayectoria que cambia continuamente. En la figura 1.7 se presentan las trayectorias de giro que poseen el plato y el portapiezas.

donde:

- ω_l es la velocidad angular del plato
- ω_{cr} es la velocidad angular del portapiezas
- ω_g es la velocidad angular del rodillo del mecanismo-guía

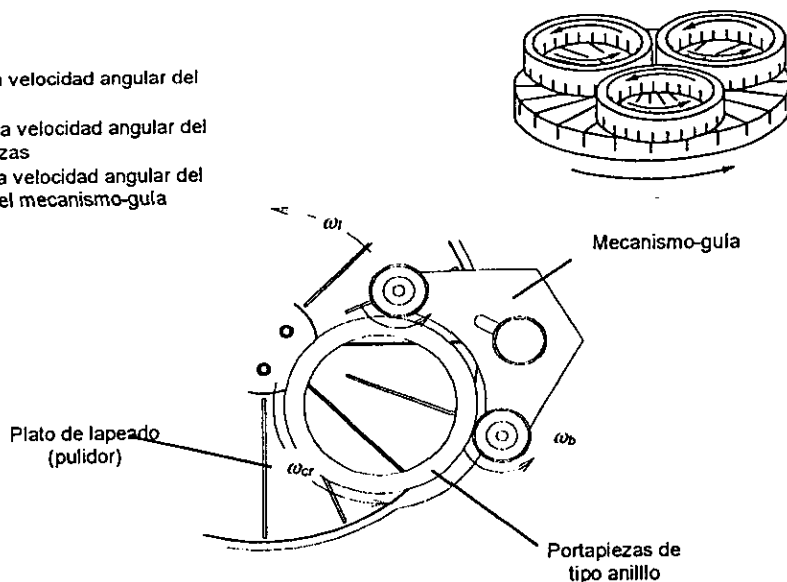


Fig. 1.7 Trayectorias de giro del plato y el portapiezas, elementos característicos de una máquina lapeadora para superficies planas.

La finalidad de producir el movimiento de un elemento respecto al otro, es asegurar que se tengan nuevos contactos [1], evitándose el incrustamiento permanente y el patrón previo de movimiento de los granos abrasivos sobre la superficie del plato, lo cual ocasionaría un acabado no deseable. Así mismo, se tiene que la pieza de trabajo produce un desgaste uniforme que ayuda a conservar la planicidad del plato.

1.2.8 Capacidad del proceso

A continuación se presentan la capacidad que tiene el proceso de lapeado, desde cuatro puntos de vista distintos:

I. Material

En cuanto al tipo de materiales que se pueden lapear, el proceso de lapeado ha demostrado tener una gran flexibilidad. Es conveniente indicar que el lapeado se aplica principalmente en el acabado de piezas de acero o hierro fundido [4]. Sin embargo, el lapeado es empleado en otros materiales tan diversos, como: vidrio, aluminio, bronce, magnesio, cuarzo, compuestos plásticos y cerámicos. En la práctica resulta más satisfactorio el lapeado de materiales duros; ya que en el caso de materiales suaves, se puede incrementar el tiempo de retención de abrasivos, lo cual es desfavorable [4].

II. Geometría de la pieza

En la práctica, el lapeado es principalmente aplicado para el acabado de superficies planas, en superficies interiores y exteriores de cuerpos cilíndricos y en superficies esféricas [3, 4]. Sin embargo, este proceso puede ser empleado en el acabado de piezas cónicas, superficies con doble curvatura o

con formas más especiales, como pueden ser: ensambles de rodamientos, engranes rectos o helicoidales.

III. Tamaño o peso de la pieza

Respecto al tamaño de la pieza, su límite está definido por la capacidad dimensional de las máquinas lapeadoras existentes en el mercado. Si se habla de superficies planas que requieren lapearse, de acuerdo con [4], se tiene que son generalmente piezas pequeñas que van de 6 a 80 cm² (1 a 12 in²); pero en algunos casos se puede lapear satisfactoriamente piezas con una superficie hasta de 1300 cm² (200 in²).

En la tabla A-1 (Ver apéndice A), tomada del ASM [3], se presenta la información relacionada con las capacidades de las máquinas lapeadoras con portapiezas en forma de anillo (utilizadas para el lapeado plano), dentro de las cuales se puede ubicar *la Máquina Lapeadora con la Aplicación de un Cojinete Neumático ("MALCON")*. Esta tabla incluye a las máquinas cuya capacidad está definida a partir del diámetro del plato de lapeado, siendo de 305 hasta 2135 mm (12" a 84"), en combinación con el diámetro interno de los anillos, que van desde los 108 a 813 mm (4¼" a 32") [3].

IV. Altura de las piezas

Debe mencionarse, que la altura de la pieza está determinada en primera instancia por las dimensiones del portapiezas. Así mismo, la altura de la pieza (h_w) se ve limitada también por otros factores, tales como las condiciones generales de operación y más particularmente por la relación entre el peso y el área de la superficie por lapear (A_c) [3]. La importancia de esto último consiste en procurar que tal proporción sea lo suficientemente baja para prevenir el brincoteo y agitación de la pieza durante el lapeado [3].

No hay un dato específico sobre una altura máxima que deba tener la pieza por ser lapeada. Sin embargo, se comprende que en cuanto menor sea la altura de la pieza, el proceso de lapeado, generalmente, será más fácil de realizar y por ende se asegura la obtención de resultados satisfactorios. De este modo, existen antecedentes [3] de la posibilidad de lapear piezas tan delgadas cuya altura tiene un valor de 0.05 mm (0.002 ").

1.2.9 Tolerancias obtenibles en superficies lapeadas

El lapeado es un proceso mediante el cual se pueden obtener tolerancias extremadamente cerradas y finos acabados superficiales. Debe hacerse notar, tal como menciona Militzer [4], que la obtención de resultados satisfactorios depende de la correcta ejecución del proceso de lapeado, lo cual está directamente relacionado con la definición óptima de los parámetros del proceso (Capítulo 4).

En la bibliografía consultada, se observa que no hay una concordancia entre los autores que permita indicar un rango específico de los alcances que tiene el proceso de lapeado. De este modo, a continuación se exponen algunos de los datos encontrados, haciendo mención únicamente a las características que están relacionadas con el lapeado de superficies planas:

- Cantidad de material removido (Acabado superficial)

De acuerdo con [3], en el lapeado de superficies planas se remueve menos de 130 μm (5 μin) de material de la superficie de la pieza; por otro lado, en [1] y en [7], se menciona que la cantidad de material removido es normalmente menor de 30 μm y aún menor de 10 μm de espesor, respectivamente. Como se puede observar, hay una gran diferencia entre los datos expuestos y por lo tanto es conveniente sintetizarlos; por lo que haciendo referencia a lo escrito en [7], debe

indicarse que actualmente se considera que el lapeado tiene un alcance de desprendimiento de material dentro de un rango de 10 a 20 μm .

Según lo que expone Amstead [1], la exactitud dimensional del proceso se encuentra en un orden de 0.6 μm e incluso señala que se puede alcanzar límites más reducidos; esto último se confirma con la información dada en [4], la cual dice que se pueden obtener acabados superficiales tan finos como de 0.025 μm (1 μin).

- Planicidad

En la referencia [3] se menciona que con el lapeado puede lograrse una planicidad, que medida por medio de un plano óptico, produce "bandas de luz" (*one-light-band*) que van desde los 0.29 μm (11.6 μin) hasta bandas más delgadas de 0.050 μm (2 μin). Por otro lado, Militzer [4] menciona que es común encontrar superficies de piezas lapeadas con una tolerancia de planicidad de "bandas de luz" de 0.304 μm (12 μin).

Para lograr estos resultados se debe atender dos condiciones: a) Asegurar la estabilidad del portapiezas durante el proceso, con el fin de eliminar distorsiones que pudieran presentarse por efectos de fatiga; b) Mantener la superficie de trabajo del plato dentro de una tolerancia de planicidad [2].

- Paralelismo

De acuerdo con [3] las tolerancias van desde $\pm 2.5 \mu\text{m}$ (100 μin) en piezas pequeñas, hasta $\pm 25 \mu\text{m}$ (1004 μin) en piezas grandes. En esta característica influye el número de piezas y la variación de espesor de la piezas [3]. A la vez se requiere atender distintos detalles, como son: la limpieza y el aseguramiento de la planicidad, tanto del plato de lapeado como de los dispositivos de presión.

A continuación se presenta una tabla, tomada de la referencia [4], con el fin de presentar los datos que se tomaron como base de comparación para analizar los resultados de las pruebas de caracterización del prototipo de la "MALCON" (Capítulo 4). En esta tabla se presentan las tolerancias asociadas con el lapeado, que de acuerdo con el autor pueden ser de dos tipos: tolerancias normales (*normal tolerance*) y tolerancias ajustadas (*tight tolerance*). Se entiende que el primer tipo está relacionado con un lapeado de baja precisión, y el segundo con un lapeado en donde se requiere una mayor precisión.

Característica	Tolerancia normal		Tolerancia ajustada	
	μm	μin	μm	μin
Diámetro u otra dimensión	± 0.6	± 25	± 0.4	± 15
Planicidad, circularidad, o rectitud	± 0.6	± 25	± 0.3	± 12
Acabado superficial	0.1-0.4	4-16	0.025	1-4

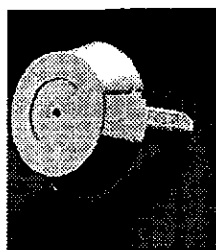
Tabla 1.1 Tolerancias dimensionales recomendadas para superficies lapeadas

En general, se debe indicar que las tolerancias propias del lapeado están directamente relacionadas con los siguientes aspectos: las características particulares de la superficie, la exactitud en las dimensiones y geometría de la operación precedente (rectificado) al proceso de lapeado, y la correcta utilización del plato (únicamente como herramienta para el acabado superficial).

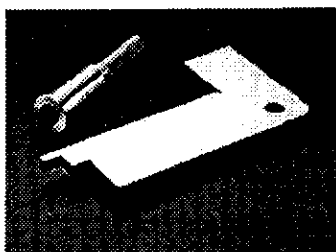
1.2.10 Ejemplo de piezas lapeadas y sus aplicaciones

Se ha observado que existe una falta de información sobre los objetos que son comúnmente lapeados, por lo que resulta conveniente mencionarlos. Estos productos se pueden clasificar en cuatro grupos: instrumentos de referencia (p.e. bloques patrón; calibradores de anillo, de machos, de hilos), piezas cuyo objetivo es

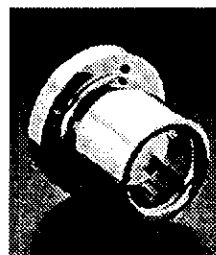
el sellado o evitar la fuga de fluidos (p.e. válvulas de alivio, émbolos de inyección de combustible, anillos de estancamiento, arandelas de empuje), productos en los cuales se desea reducir la fricción entre elementos (engranes, cabezas de pistón, rodamientos) y el grupo de los elementos con aplicaciones ópticas (prismas, espejos). Debe hacerse énfasis en que el proceso de lapeado es determinante en la funcionalidad de todos los productos antes mencionados. En la figura 1.8 se puede observar diversas piezas que han sido lapeadas.



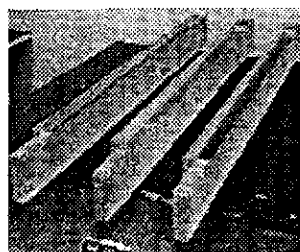
(a)



(b)



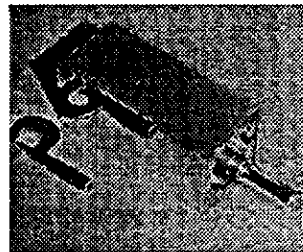
(c)



(d)



(e)



(f)

- a. Pieza con superficies (cónica y plana) lapeadas.**
- b. Pieza lapeada en sus superficies planas y perno lapeado.**
- c. Elemento mecánico lapeado en sus superficies cilíndricas.**
- d. Barras de cuarzo utilizadas como patrón para verificar rectitud.**
- e. Rodamientos de aire usados en la manufactura de semiconductores.**
- f. Espejo rotatorio de reconocimiento para aplicaciones militares.**

Fig. 1.8 Ejemplos de piezas lapeadas.

1.2.11 Aspectos económicos de la operación de lapeado

En cuanto al volumen de producción que se puede procesar, conviene que el lapeado de unas cuantas piezas o de alguna pieza que necesite un requerimiento especial sea realizado en una forma manual y que una producción mayor sea efectuada por medio de máquinas lapeadoras. Para dar una idea más clara de lo anterior, se presenta los costos de inversión de un plato para lapeado manual y el de una máquina lapeadora de baja capacidad de características similares:

Lapeado manual	Lapeado mecánico
Plato ranurado para lapeado manual de 18" de diámetro, con 0.45 kg (1 lb.) de pasta abrasiva para lapear.	Lapeadora "Lapmaster Machine"™ con plato de lapeado de 15" de diámetro y con tres portapiezas de tipo de anillo.
Costo de inversión: 648 dls.* (5,500 pesos)	Costo de inversión: 8,460 dls.* (71, 910 pesos)

* Datos tomados del catálogo de productos 1994 de "Lapmaster Machine"™ [8], y cotizados en moneda nacional en febrero de 1997.

Tabla 1.2 Comparación de los costos de inversión entre un lapeado manual y un lapeado mecánico.

CAPITULO 2

PARAMETROS DEL PROCESO DE LAPEADO

2.1 IDENTIFICACION DE LOS PARAMETROS DEL PROCESO DE LAPEADO

Los propósitos del lapeado están vinculados con dos aspectos básicos: Obtener una superficie con un acabado de alta calidad o mejorar la exactitud dimensional de la pieza. Considerando el lapeado desde un punto de vista general, los aspectos más importantes que determinan los alcances de éste son los siguientes:

- Preparación de la pieza de trabajo
- Las características del plato de lapeado.
- Las características de la mezcla abrasiva, las cuales dependen de la selección del abrasivo, del vehículo y de los aditivos.
- La determinación de valores óptimos de la presión, el tiempo y la velocidad de lapeado.
- Limpieza del ambiente.

Es conveniente señalar que debido al escaso número de investigaciones que se han realizado para estudiar en detalle el proceso de lapeado, no hay datos numéricos precisos que se puedan asignar a los parámetros anteriores, por lo que se debe destacar que la experiencia y la habilidad tienen un papel importante para definir los parámetros del lapeado óptimos en una operación particular [3, 7, 19, 20].

Hablando en términos generales, debe señalarse que el material por lapear definirá cualitativamente y cuantitativamente los parámetros o condiciones bajo los cuales se efectuará el proceso. Por otro lado, se debe indicar que la mayoría de estos parámetros están relacionados íntimamente con la cantidad de material removido y con las irregularidades de la superficie; siendo que el primero a la vez se relaciona con la corrección de forma y dimensiones de la superficie, y el segundo con la calidad de acabado. Por lo tanto, antes de abundar sobre los parámetros involucrados en el lapeado, es necesario hablar brevemente de las irregularidades superficiales y de la remoción de material.

2.1.1 Irregularidades de la superficie

Se entiende como rugosidad a las irregularidades microgeométricas que existen en una superficie; es decir, si se marca un perfil de la pieza y se observa al microscopio, se tiene que éste no está perfectamente acabado ya que presenta orificios y grietas (Ver figura 2.1a). Estas irregularidades pueden resultar de factores tales como: la flexión de la pieza durante el maquinado, falta de homogeneidad en el material, deformaciones por tratamientos térmicos, vibraciones, etc. Para cuantificar la rugosidad existen ciertos parámetros a medir, los cuales a continuación se mencionan.

- R_m . El promedio de las alturas de las irregularidades de la superficie, es la distancia promedio entre los cinco puntos más altos y los cinco puntos más bajos del contorno de la pieza, localizados dentro de una longitud de muestreo (l_s) y en

relación con una línea de referencia (Ver figura 2.1b). Tal característica se puede expresar algebraicamente de la siguiente forma:

$$R_{im} = \frac{[(w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5) - (g_1 + g_2 + g_3 + g_4 + g_5)]}{5} \quad \dots(2.1)$$

- R_r . Es la distancia entre el pico más alto y el valle más bajo de un perfil de rugosidad, también se le denota como $R_{máx}$.
- R_a . Es la media aritmética de los valores absolutos de los alejamientos del perfil desde la línea central de la gráfica (l_c) dentro de la longitud de evaluación (l_e).

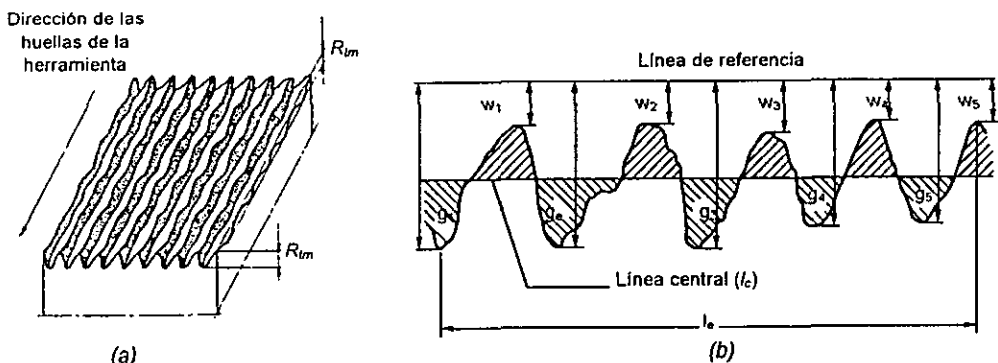


Fig. 2.1 Irregularidades de una superficie.

2.1.2 Remoción de material

La remoción de material (Q) que se obtiene en el lapeado, se refiere a la cantidad de metal que se desprende de la pieza como efecto de la acción abrasiva. Se ha observado que la medición de la remoción de material puede ser representada por medio de dos razones distintas:

a) Q_v El volumen de material que se desprende durante un tiempo (mm^3/min).

b) Q_p El peso de material que se remueve por unidad de tiempo (mg/min).

Debe mencionarse que la razón volumétrica de remoción de material (Q_v) es la que utiliza Kackzmareck [7] para explicar el comportamiento de los parámetros de lapeado. Así se tiene que el volumen total de material removido en un tiempo determinado desde una área de superficie bien definida, es la suma de los volúmenes removidos por cada uno de los granos cortantes. Lo último significa que el volumen total va a depender del número de granos y del volumen promedio que puede remover un solo grano.

Por otro lado, la segunda razón de la remoción de material (Q_p) es la que emplea Matsunaga [9] para valorar sus experimentos sobre el lapeado.

2.2 CARACTERISTICAS DEL PLATO DE LAPEADO

Los platos de lapeado son fabricados principalmente con hierro fundido (de grano compacto) o algún otro metal no ferroso (aleaciones de cobre, plomo) [3, 4, 7, 9, 19]. Existen otros materiales con los que se pueden también fabricar, como son: acero, ciertos plásticos, materiales cerámicos (espejo de vidrio), madera y cuero. Debe mencionarse que, para ciertas aplicaciones, se utilizan platos hechos con abrasivo aglutinado [3].

La selección del material del plato es primordial para que el lapeado de un trabajo particular se realice correctamente. Esta selección se fundamenta en la aplicación de una dureza adecuada (H_{RB}) con la cual se busca que los granos se incrusten temporalmente en la superficie del pulidor y a la vez que estos cambien su posición repetidamente, por lo que cada grano puede cortar con varias esquinas en vez de

una. Esto da lugar a la regla principal del lapeado: "El plato debe ser más suave que la pieza, ya que por el contrario la pieza se cargaría con el abrasivo y cortaría al plato". De este modo se logra que el abrasivo tenga un tiempo de vida más largo, incrementándose la remoción de metal y mejorando la calidad del acabado y capas de la superficie [7, 19].

El empleo de un plato suave permite que el corte sea más rápido, que la mezcla abrasiva cubra toda el área de trabajo y se relaciona con un acabado más brillante en la superficie de trabajo [3]. Sin embargo, un plato muy suave ocasiona que los granos de abrasivo se incrusten muy profundamente y permanentemente sobre la superficie del plato; de este modo, las esquinas de los granos que sobresalen se desgastan originando un decremento en la remoción de material, pérdidas en la planicidad y paralelismo y generan acabados grisáceos en la superficie de la pieza [7, 19].

Un plato de mayor dureza corta más despacio y cubre rápidamente el área de trabajo, da un acabado ópaco a la superficie de la pieza, pero la exactitud dimensional de ésta es muy grande [3]. En el caso extremo, el uso de platos demasiados duros ocasionan que los granos se fragmenten más rápidamente y que sus períodos de incrustamiento sean muy cortos, lo cual se traduce en un desgaste adelantado de la mezcla abrasiva y una baja remoción de material; así mismo, hace que algunos granos tiendan a moverse hacia el interior del plato, ocasionando que la pieza presente un acabado vidriado o con rasguños [7, 19].

Por otro lado, la presencia de suciedad y otras impurezas sobre la superficie del plato puede ocasionar rayaduras, lo cual es más notorio cuando se utiliza un compuesto de lapeado muy viscoso.

2.3 PREPARACION DE LA PIEZA DE TRABAJO

Sea cualquiera el propósito del lapeado, las irregularidades de la superficie obtenidas en la operación del maquinado precedente definirán los alcances del proceso de lapeado. Por lo tanto, es de gran importancia que las piezas que se vayan a lapear tengan un acondicionamiento previo, el cual consiste en:

a) Aproximación dimensional de la superficie. Debido a que la remoción de metal mediante lapeado es baja (de 10 a 20 μm), se recomienda que las superficies sometidas a este proceso tengan un R_m asociado a un número de rugosidad entre 8 y 6, para lo cual se requiere que la superficie por trabajar sea previamente rectificada (Ver tablas A-5 y A-6 del apéndice A).

b) Aseguramiento de bordes u orillas lisos y uniformes. Las irregularidades en los bordes de una pieza ocasionan que los granos de abrasivo se rompan en una forma no deseada, lo cual lleva a la formación de patrones inadecuados o rasguños (conocidos técnicamente como 'bola de zorro') sobre la superficie de la pieza (Ver figura 2.2a). La acción preventiva consiste en pulir los bordes de la pieza con un abrasivo fino, lo cual además proporciona un borde más resistente al despostillamiento.

c) Eliminación de declives (drop-off) en los bordes. Las piezas que tienen declives en las orillas desde las operaciones previas están expuestas a un corte hidráulico en el lapeado. El corte hidráulico consiste en que los granos de abrasivo tienden a depositarse permanentemente en el área del declive, por lo que su acción de corte no es realizada óptimamente (Ver figura 2.2b). La acción preventiva consiste en un pulido preliminar de la pieza; en el caso que los declives no se puedan eliminar, la solución consiste en utilizar una menor cantidad de abrasivo.

d) *Eliminación de partículas metálicas adheridas en la superficie.* Debe removerse toda partícula metálica excedente de la superficie por lapear, evitando así que los platos se carguen con tales partículas que ocasionarían rasguños en la pieza de trabajo.

e) *Limpieza general de la superficie por lapear.* El exceso de polvo, grasa o cualquier agente extraño puede ocasionar un acabado no deseable.

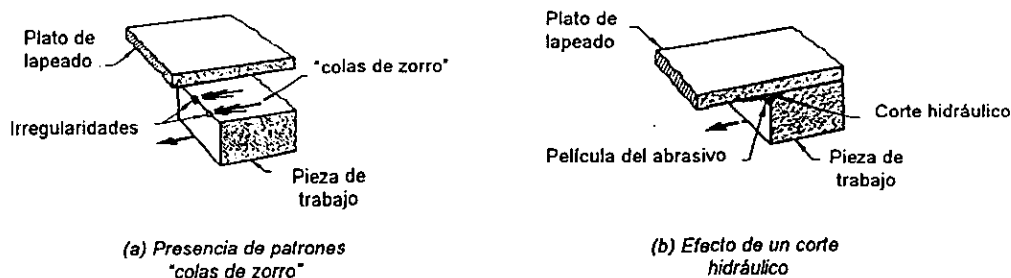


Fig. 2.2 Efectos indeseables en el lapeado de una pieza como consecuencia de una mala preparación de ésta.

2.4 SELECCIÓN DE LA MEZCLA ABRASIVA

Para efectuar la acción de abrasión en el lapeado, es muy común utilizar una mezcla abrasiva la cual está constituida por dos elementos: los abrasivos (en forma de polvo) y un vehículo. Las mezclas abrasivas empleadas para lapear son principalmente de dos tipos: a) las que resultan al combinar el polvo abrasivo con un compuesto lubricante sólido (grasoso), y b) las que están formadas por abrasivos suspendidos en un fluido de corte, conocidas vulgarmente con el nombre de 'lechada'. En general, las mezclas abrasivas aplicadas en el lapeado se van a particularizar por:

- las propiedades del abrasivo que la componen
- las propiedades del vehículo (compuesto grasoso o aceitoso)
- su grado de concentración
- su grado de regeneración o dosificación

2.4.1 Selección del abrasivo

Los polvos abrasivos utilizados en el lapeado se caracterizan principalmente por su tamaño y su dureza (Ver tabla 2.1), siendo que cada abrasivo produce un acabado distinto. El tamaño del polvo abrasivo (a) está determinado por los límites de las dimensiones características del grano.

De acuerdo con [3, 7, 19], en la mayoría de las aplicaciones del lapeado es muy común el uso de alúmina calcinada (variante de óxido de aluminio) y del carburo de silicio.

- El grano de carburo de silicio es extremadamente duro, agudo y quebradizo, por lo que resulta ideal en el proceso ya que continuamente se fragmenta hacia su interior dando origen a nuevos filos cortantes. Es utilizado principalmente para lapear aceros endurecidos y hierro fundido o cuando se desea remover una apreciable cantidad de material ("desbaste"), así también sirve para lapear varias clases de aluminio.
- El grano de alúmina tiene una dureza de 2000 Hv; es también agudo, pero más resistente que el del carburo de silicio, por lo que su fragmentación es más lenta. La alúmina es generalmente usada en el lapeado de aceros suaves y metales no ferrosos; sin embargo con algunas alúminas (p.e. # 38) se pueden lapear aceros de alta dureza, aceros inoxidable, cromo y materiales cerámicos.

Por otro lado, es común el empleo de carburo de boro para lapear piezas de carburos sinterizados; el polvo de diamante en el lapeado de materiales con una dureza mayor a 64 H_{RC}; y el óxido de cromo para obtener una muy alta calidad superficial en aceros inoxidables, cromo y otros metales duros, aunque también se utiliza en aleaciones de cobre y plásticos.

Abrasivo	Tamaño de grano *(a) [μm]	Dureza Vickers* (H _V)
Carburo de silicio	100 - 5	2500
Alúmina calcinada	70 - 5	2000
Carburo de boro	60 - 5	2800
Polvo de diamante	5-0.5	6500

* datos tomados de la referencias [3 y 7].

Tabla 2.1 Características de los principales abrasivos utilizados en el lapeado

En la práctica se tienen algunas reglas prácticas sobre el uso de abrasivos, las cuales son:

- Se debe evitar lapear con diferentes clases de abrasivos o distintos tamaños de granos del mismo abrasivo, en el mismo tiempo o con el mismo pulidor.
- El abrasivo debe ser al menos tan duro como el metal de la pieza de trabajo; así mismo, se tiene que "para un material suave, un abrasivo suave".

2.4.2 Selección del vehículo

El vehículo que compone a la mezcla debe cumplir con ciertas funciones y características, las cuales son:

- Asegurar una lubricación suficiente.
- Ofrecer una temperatura de enfriamiento adecuada.

- Responder a la variación de temperaturas con las características, flexibilidad o estabilidad, de viscosidad deseadas.
- Tener ciertas propiedades de adhesión (lo cual facilita el contacto de los granos abrasivos con la superficie del plato y a la vez evita el desperdicio de la mezcla abrasiva).
- Retener a los abrasivos en una suspensión uniforme y desaglomerada.
- Servir como un amortiguador entre las superficies que están involucradas en el lapeado (minimiza el contacto de una parte predominante del plato y así se regula la acción de rodamiento de las partículas abrasivas).
- No ser tóxico.
- Ser fácil de remover o limpiar.

La selección del vehículo se basa en el material a ser lapeado y en la forma de la pieza. La mayoría de los vehículos poseen una base aceitosa o grasosa, pero también existen los compuestos solubles en agua.

Los vehículos en forma de compuestos lubricantes sólidos que más se utilizan son los siguientes: grasa, estearina y cera; en algunos casos, el grafito coloidal se añade en la mezcla para mejorar las propiedades de lubricación.

Los vehículos que son líquidos lubricantes deben tener una densidad favorable junto con las propiedades mencionadas. En el lapeado es muy notorio encontrar que se utilicen los siguientes fluidos de corte: aceite para máquinas, otros aceites comunes y parafina.

Por otro lado, existen algunas aceites y aditivos especiales (p.e. el compuesto GOI producido en el Instituto Óptico de la ex-USSR, mencionado en [7]) que actúan como "lechada" y también como activadores superficiales y por lo que su influencia

resulta evidente en el acabado de una pieza cuando la profundidad de corte de los granos es muy pequeña.

Para seleccionar el vehículo adecuado de la mezcla abrasiva se tienen las siguientes recomendaciones:

- Los abrasivos mezclados con un vehículo grasoso (de mayor viscosidad) puede dar mejores resultados que una mezcla de abrasivo con un fluido aceitoso.
- Existe información en la literatura para seleccionar el material del plato y la composición de la mezcla abrasiva (abrasivo:vehículo) para un trabajo de lapeado particular (Ver en el apéndice A la tabla A-3 y A-4).

2.4.3 Efecto de la concentración de una mezcla abrasiva

Las mezclas abrasivas se caracterizan por su grado de concentración (volumétrico o gravimétrico), del cual va a depender el número de granos que actúan en una unidad de área de la superficie de trabajo. Con base en los estudios realizados por Kackzmarek [7], en la figura 2.3 se presenta el efecto que tiene el grado de concentración de la mezcla (m) y la presión (p) sobre la cantidad de material removido (Q).

De la gráfica anteriormente mencionada se pueden mencionar las siguientes conclusiones:

- Existe una presión óptima y un grado de concentración óptimo en el cual se obtiene una remoción de metal máxima.
- Al aumentar el grado de concentración (m) es necesario un incremento correspondiente en la presión (p), para asegurar una remoción de metal máxima ($Q_{l\ max}$).

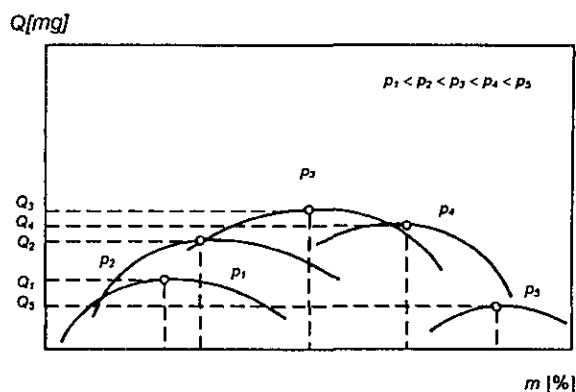
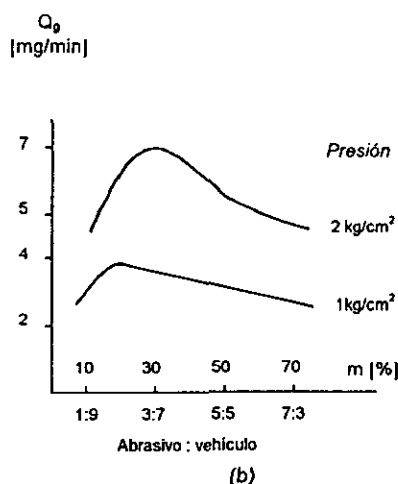
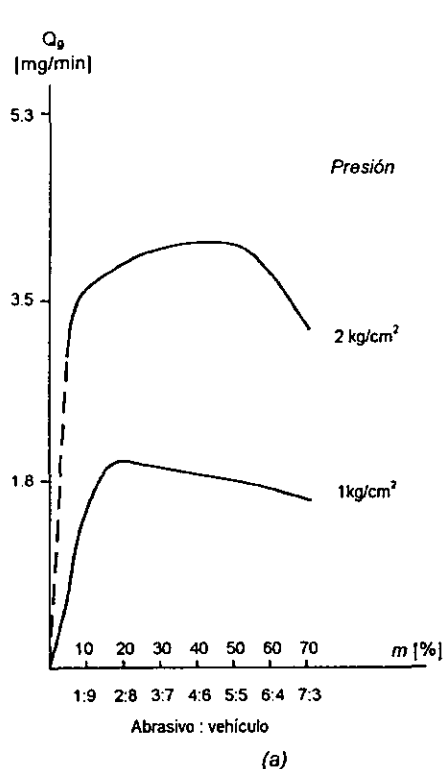


Fig. 2.3 Efecto del grado de concentración de la mezcla abrasiva (m) y la presión (p) sobre la remoción de metal (Q); para un tamaño de grano (a) constante

- Después de exceder un determinado valor del grado de concentración, el aumento correspondiente en la presión no da como resultado un incremento en la remoción de metal.
- Al incrementar la concentración de abrasivo en la mezcla (para una presión y un tamaño de grano constantes), resulta en un incremento del número de granos por unidad de área pero también se reduce la presión ejercida sobre el grano, resultando un decremento en la cantidad de material removido, ya que la acción de corte de cada grano disminuye más rápido que lo que se incrementa el número de granos que trabajan. Esto ocasiona acabados opacos, una falta de control en la dimensión y declives en la pieza.
- En una concentración muy baja (para una presión y un tamaño de grano constantes), hay una reducción de la remoción de metal, ya que la presión ejercida sobre los granos excede la resistencia a la compresión de un cierto número de ellos y estos son quebrados. Las películas de abrasivo delgadas ocasionan una falta de control en la dimensión, pero en cambio producen un acabado brillante y pueden resultar en un acabado vidriado [7].

Algunos aspectos prácticos concernientes al grado de concentración de la mezcla, son los siguientes:

- La cantidad del vehículo tiene un valor óptimo cuando éste permite formar y mantener una película extremadamente delgada y continua entre la superficie del plato y de la pieza, humedeciendo a todos los granos que actúan en el proceso.



(a) Efecto de la relación abrasivo:vehículo sobre la razón de remoción de material, para un abrasivo de alúmina ($35 \mu m$) y alimentado continuamente.

(b) Efecto de la relación abrasivo:vehículo sobre la razón de remoción de material, empleando carburo de silicio ($55 \mu m$) y alimentado continuamente.

Fig. 2.4 Efecto del grado de concentración (m) y la presión (p) sobre la razón de remoción de material (Q_p), para dos casos particulares.

- Con base en los resultados de los experimentos que realizó Matsunaga [9] para estudiar el comportamiento del lapeado, se puede concluir que para concentraciones de 2:8 a 3:7 (20 al 30%) se alcanza la remoción máxima de material, cuando la presión es baja (1 kg/cm^2); por otro lado, para concentraciones en un rango de 3:7 a 5:5 (30 a 50%) se tiene una remoción máxima, cuando la presión es alta (2 kg/cm^2). Estos resultados concuerdan con los resultados obtenidos por otros autores (Imanaka y K.Sato) a los cuales hace referencia el autor antes citado. Así mismo, se puede observar que para concentraciones menores al 10% o mayores al 70% hay un decremento muy notorio en la remoción de material. Lo dicho anteriormente se puede corroborar en la figura 2.4, en la cual se presentan los resultados de dos experimentos realizados por Matsunaga [9].

2.4.4 Dosificación de la mezcla abrasiva

En la práctica, se tiene que el suministro de la mezcla abrasiva es dosificado (y recirculado) con el propósito de tener una mezcla abrasiva uniforme, es decir, asegurar que los granos abrasivos estén bien dispersos. Después de analizar los diversos experimentos que realizó Matsunaga [9], se puede observar que al incrementar los períodos de dosificación de la mezcla (T) da como resultado una disminución en la cantidad de material removido, siendo más notorio cuando la presión es más alta. De tal modo, se puede concluir que una alimentación continua o una dosificación en períodos cortos resulta más práctica; así mismo, se puede decir que para presiones muy bajas (menores a 2 kg/cm^2) y para diferentes períodos de alimentación, se obtiene prácticamente la misma cantidad de material removido. Lo dicho anteriormente se puede observar gráficamente en la figura 2.5.

Por otro lado debe señalarse que los períodos de alimentación (T) están ligados con el tiempo de lapeado (τ). En el punto 2.7 del presente capítulo se hablará de la interacción de estos parámetros.

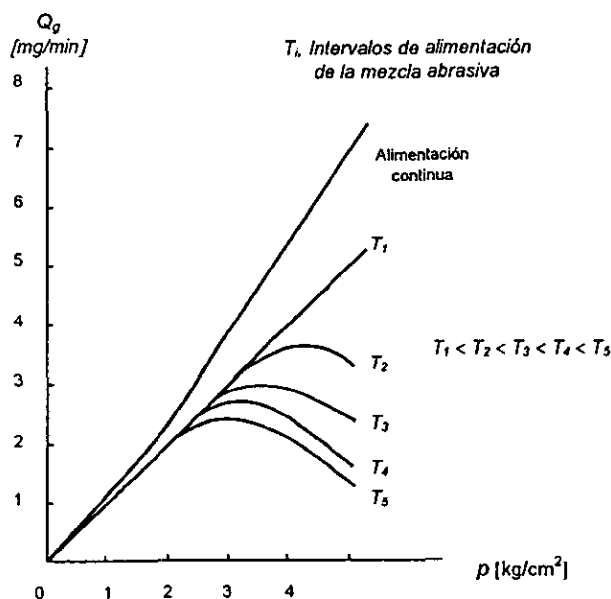


Fig. 2.5 Influencia de los periodos de alimentación de la mezcla abrasiva (T) sobre la remoción de material (Q_g).

2.5 EFECTO DE LA PRESIÓN

La calidad del acabado superficial que se desea obtener por medio del lapeado implica la selección de un valor de la presión. Existe una relación típica entre el promedio de las alturas de las irregularidades superficiales (R_m) y la presión (p). En la figura 2.6 se puede observar tal dependencia, y además se presenta la relación que hay entre la razón lineal de material removido (Q_v) y la presión (p).

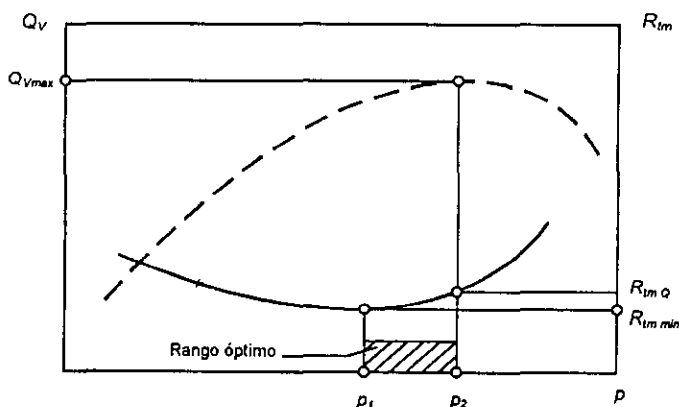


Fig. 2.6 Efecto de la presión (p) sobre la calidad superficial (R_{tm}) y la razón volumétrica de remoción de metal (Q_v).

De la gráfica anterior se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- El valor óptimo de la presión asociada con la calidad superficial (p_1) es menor que el valor óptimo de la presión relacionada con la razón de material removido (p_2).
- Se puede visualizar que hay un rango óptimo para los valores de la presión, el cual tiene como límites los valores de p_1 y p_2 ; por lo que un valor más particular de la presión (p), se debe seleccionar acorde con la calidad superficial requerida ($R_{tm p}$), ya que resulta más conveniente tener una mejora adicional en la calidad superficial que exceder el valor requerido de la remoción (Q_{vp}). De acuerdo con lo anterior se tiene:

- si $R_{tmmin} \leq R_{tm p} < R_{tmQ}$, entonces el valor de la presión debe estar dentro del rango de $p_1 - p_2$.

-si $R_{tm p} = R_{tmQ}$, entonces la presión p tendrá un valor igual a p_2 .

- Comparando las curvas correspondientes a Q_v y R_{em} , se tiene que una baja presión asegura una mejor calidad superficial; en cambio, un incremento en la presión incrementa la velocidad de corte (v) y por tanto la remoción de material; sin embargo, una presión demasiada alta se asocia con una rugosidad mayor que se observa con la presencia de rasguños en la pieza.

De acuerdo con Matsunaga [9], se puede decir que la razón de remoción de material es prácticamente proporcional a la presión, en condiciones ordinarias. Estas condiciones están dadas por: La aplicación de presiones en un rango de 0.5 a 6 kg/cm², el empleo de abrasivos con tamaño característico (a) mayor a 5 μ , una relación abrasivo:vehículo de 30 a 50%, y una alimentación continua. En la figura 2.7, lo anteriormente mencionado se puede representar gráficamente.

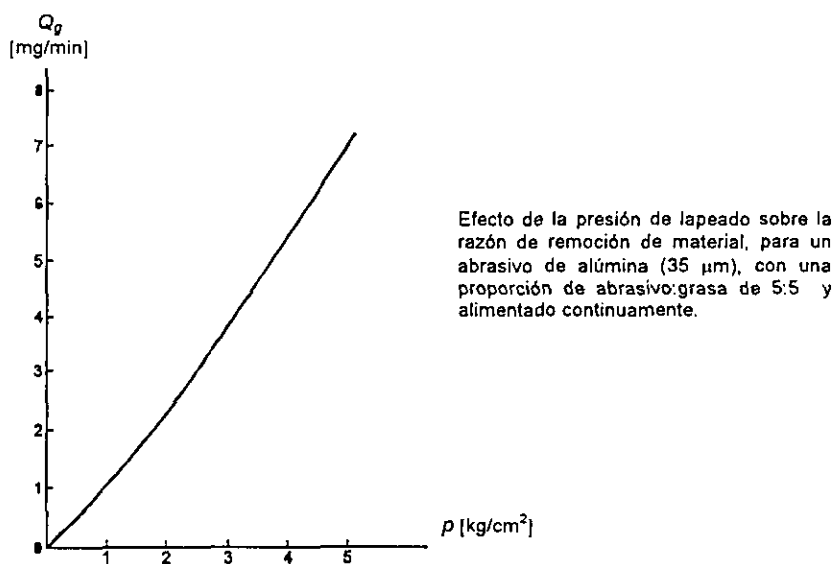


Fig. 2.7 Comportamiento de la presión (p) y la remoción de material (Q_v), bajo condiciones normales, para un caso particular.

Se han establecido ciertos valores para las unidades de presión asociadas con el abrasivo que se está utilizando y con el tipo de lapeado que se efectúa [7], que a continuación se presentan:

- a) Cuando se utiliza óxido de aluminio en un lapeado preliminar, el valor de la presión debe de estar contenido en un rango de 2 a 5 kg/cm².
- b) Para un lapeado preliminar en el que se esté empleando carburo de silicio (carborundum), la presión debe estar en un rango de 0.5 a 2.5 kg/cm².
- c) En el caso de un lapeado final, la presión debe estar dentro de un rango de 0.3 a 2.5 kg/cm².

2.6 EFECTO DEL TAMAÑO DEL GRANO ABRASIVO

En el lapeado (como en otros procesos abrasivos), la selección del tamaño apropiado del grano abrasivo (a), para una presión constante, se hace tomando en cuenta la influencia que tiene sobre la remoción de metal (Q) y en el acabado superficial (R_{ms}).

En la figura 2.8 se presenta la interrelación que hay entre la remoción de material (Q), el promedio de las irregularidades de la superficie (R_{ms}) y el tamaño de los granos abrasivos (a). Así, se pueden hacer las siguientes observaciones:

- La rugosidad de la superficie (asociada con R_{ms}) se incrementa monótonamente, en forma más o menos lineal con el tamaño de grano (a).
- La razón del metal removido (bajo una presión constante) alcanza un valor máximo (Q_{max}) para cierto tamaño de grano (a_0), por lo que, de acuerdo con Matsunaga [9] y como se puede observar en la gráfica, el trabajar con granos muy pequeños da como resultado un decremento en la razón de remoción de material.

- Cuando el lapeado está asociado con un mayor desprendimiento de material o la mejora de dimensiones, $R_{tm} \geq R_{tm0}$ o $R_{tm} = R_{tm0}$, entonces se deberán seleccionar granos de mayor dimensión característica (próximos al valor de a_0).

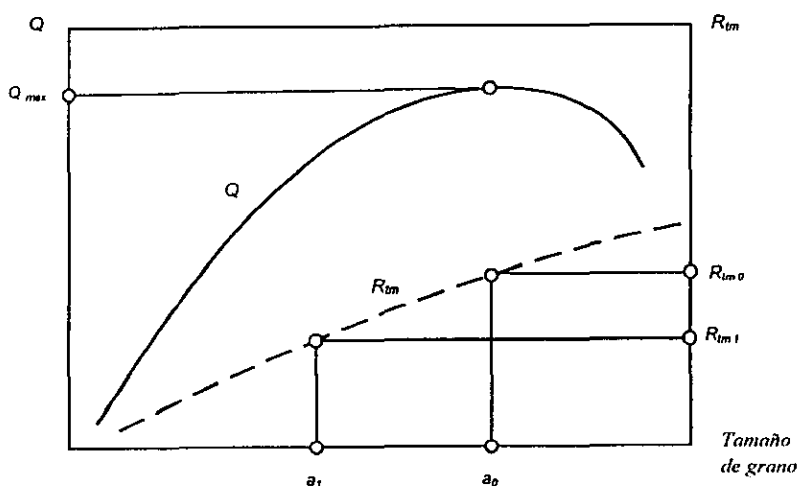


Fig. 2.8 Influencia del tamaño característico del grano abrasivo (a) sobre la remoción de metal (Q) y el promedio de las alturas de las irregularidades (R_{tm}).

- En el caso de que el lapeado sea utilizado para obtener una superficie de menor rugosidad, $R_{tm} < R_{tm0}$, entonces se deberán de escoger granos de menor tamaño. Por ejemplo, si se requiere una superficie con un R_{tm1} , la dimensión característica del grano asociada (a_1) deberá cumplir con la condición $a_1 < a_0$.
- Es conveniente señalar que en algunos casos se pueden obtener valores de a , muy próximos al valor de a_0 , por medio de seleccionar otra presión y otro valor del grado de concentración de la mezcla abrasiva (m).

Algunas reglas prácticas pertinentes son:

- Una partícula de abrasivo produce un corte (rayadura) de la mitad de su tamaño.

- Cuando la calidad de una superficie es crítica (lisa y libre de rayaduras), se recomienda emplear una mezcla con un abrasivo fino graduado. Sin embargo, un grano pequeño no implica que el acabado sea necesariamente fino.
- El tamaño de abrasivo debe ser lo suficientemente grande para remover la cantidad de material deseado y a la vez que permita su rompimiento en partículas internas.

2.7 EFECTO DEL TIEMPO DE LAPEADO

La influencia del tiempo durante el cual trabajan los granos de abrasivo sobre el proceso de lapeado, es explicado principalmente por dos fenómenos: El desgaste en las esquinas de los granos y la ruptura del grano. Este último fenómeno tiene gran tendencia a ocurrir debido a que las dimensiones y el esfuerzo de compresión de cada grano no son uniformes. De este modo, se tiene que sólo una parte de los granos puede admitir la carga total que les es aplicada.

En la figura 2.9 se presenta la relación típica que hay entre la remoción de metal (Q_L), el promedio de alturas de las irregularidades de la superficie maquinada (R_{tm}), y el número de granos que se incrustan en el pulidor (Z) con el tiempo de lapeado (τ). De esta figura se puede comentar lo siguiente:

- Cuando la presión es más baja que el valor óptimo (curva Q_A), el desgaste de las esquinas de los granos y el de la desintegración de estos tienen una influencia reducida en la remoción de metal.
- Si la presión tiene inicialmente un valor mayor que el óptimo (curva Q_B), después de una desintegración parcial de los granos, la presión tiende al valor óptimo. Esto último es representado en la curva Q_B del diagrama por un incremento momentáneo de la razón de remoción de metal, seguido por un decremento de carácter monótono, a través del tiempo (τ).

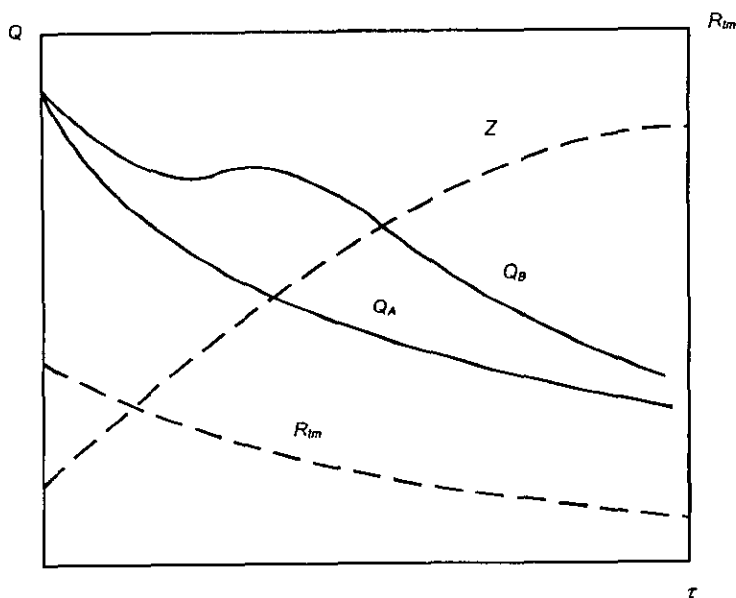
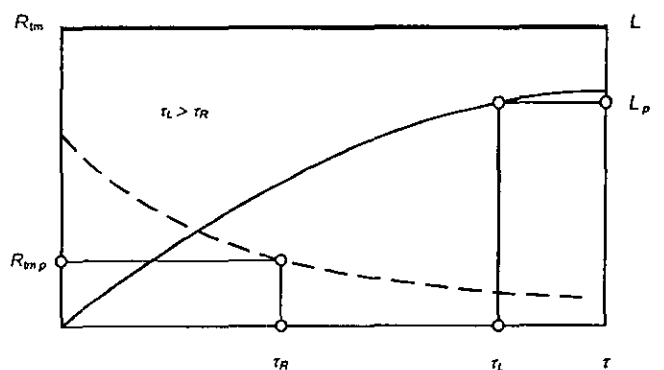


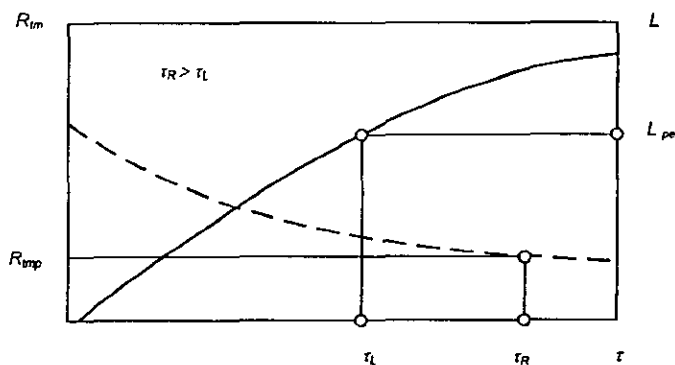
Fig. 2.9 Relación entre la remoción de metal (Q), el promedio de las alturas de las irregularidades de la superficie (R_m), el número efectivo de granos abrasivos (z) y el tiempo de lapeado (τ).

- La calidad de la superficie (asociada con R_m) tiende a mejorar (en una forma monótona) conforme aumenta el tiempo de lapeado, por lo que después de cierto tiempo, los cambios en la superficie son muy poco notorios.
- De modo similar, hay un incremento monótono del número de granos abrasivos que actúan conforme transcurre el tiempo.

La determinación del tiempo de lapeado (τ) depende de los requerimientos establecidos, como son: los valores permisibles de los parámetros concernientes a la calidad de la superficie (R_{mp}) y de la pérdida lineal de la dimensión de la pieza de trabajo (L_p). En la figura 2.10 se presentan las dos combinaciones de los requerimientos correspondientes, L_p y R_{mp} , con respecto a la dependencia del tiempo de lapeado (τ) sobre R_m y L .



(a)



(b)

Fig. 2.10 Efecto del tiempo de lapeado (τ) sobre la pérdida lineal de dimensiones (L) y la calidad superficial (R_{tm}).

En la figura 2.10a se indica que la calidad de la superficie deseada (R_{mp}) es obtenida antes que la pérdida lineal permisible (L_p). En la figura 2.10b se presenta el caso contrario.

Desde el punto de vista práctico se prefieren las condiciones establecidas en la figura 2.10a. Esto se debe a que, generalmente, es más conveniente tener una mejora adicional de la calidad superficial más allá de los requerimientos dados, mientras que resulta desfavorable exceder el valor requerido de la pérdida lineal de dimensiones. Lo anterior lleva a la siguiente conclusión: Se debe procurar que los valores de los parámetros de maquinado anteriormente estudiados permitan establecer la menor diferencia entre los valores de τ_R y τ_L .

En el análisis de las gráficas 2.10a y 2.10b no se consideró la adición periódica del abrasivo (T). En la práctica es necesario dosificar la mezcla abrasiva, por lo que la dependencia del tiempo de lapeado sobre la pérdida lineal de dimensiones (L) y la calidad superficial (R_{tm}) cambia su carácter. Lo dicho se presenta en la figura 2.11 [7].

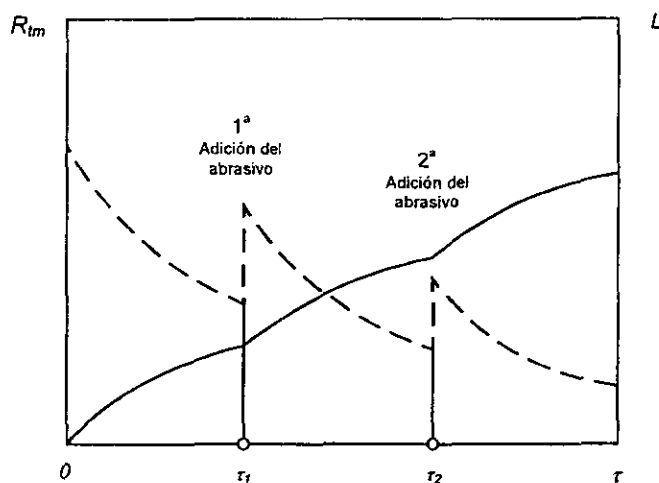


Fig. 2.11 Influencia del tiempo de lapeado (τ) sobre la pérdida lineal de dimensiones (L) y la calidad superficial (R_{tm}), considerando la adición periódica de la mezcla abrasiva (T).

2.8 VELOCIDAD DE LAPEADO

La velocidad de lapeado depende de varias variables como es el material a lapear, material del plato, tipo de vehículo, tipo y tamaño de abrasivo, presión y la experiencia del operador [19].

La velocidad de lapeado (v), dada por la relación de velocidades que hay entre el pulidor (plato de lapeado) y la superficie de trabajo, es uno de los parámetros más efectivos que permiten controlar la relación que hay entre la pérdida lineal de las dimensiones y la calidad superficial. En la figura 2.12 se presenta el efecto de la velocidad de lapeado (v) sobre la pérdida lineal (L) y el promedio de las irregularidades de la superficie lapeada (R_{im}).

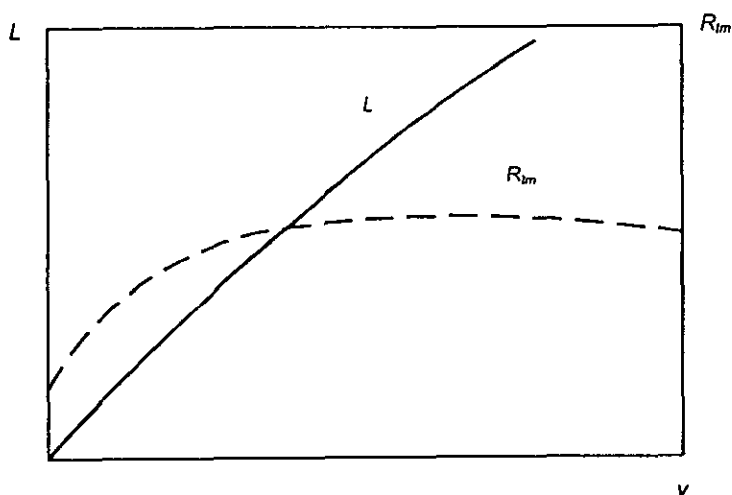


Fig. 2.12 Efecto de la velocidad de lapeado (v) sobre la pérdida lineal de dimensiones (L) y la altura media de las irregularidades de la superficie (R_{im}).

Observando el diagrama anterior y de acuerdo con las figuras 2.10a y 2.10b, se recomienda trabajar con una baja velocidad de lapeado, ya que la pérdida lineal de dimensiones decrece al reducir la velocidad en una proporción más alta que la que está asociada con la rugosidad de la superficie, por lo tanto, se espera que aparezca la igualdad $\tau_R = \tau_L$ o la desigualdad $\tau_R < \tau_L$.

Los rangos de velocidad que a continuación se presentan son aplicados en máquinas lapeadoras para superficies planas:

- Para un lapeado de exactitud media (preliminar), p.e. para números de rugosidad del 8 al 10 y para tolerancias de maquinado alrededor de 0.5 mm, la velocidad de lapeado debe estar en un rango de 200-400 m/min.
- Para un lapeado exacto (afinado), p.e. para números de rugosidad del 10 al 12 y tolerancias de maquinado próximas a 0.25 mm, se recomienda una velocidad que esté en un rango de 100-250 m/min.
- Para un lapeado muy exacto, p.e. para números de rugosidad del 12 al 14 y alcances de maquinado alrededor de 0.04 mm, la velocidad de lapeado recomendada deberá estar en un rango de 10-100 m/min.

Se debe seleccionar una velocidad tomando en cuenta el desgaste del pulidor y la generación de condiciones de disipación de calor.

2.9 INFLUENCIA DE LAS VIBRACIONES EN EL LAPEADO

Con el fin de incrementar la cantidad de material removido (Q) por el lapeado, la adición de vibraciones puede ser aplicada durante el proceso [7 y 14]. Este método es denominado como lapeado vibratorio (*vibratory lapping*). La remoción de metal puede entonces incrementarse alrededor de un 30 a un 40%, pero simultáneamente la altura de las irregularidades superficiales, asociada con la calidad superficial,

crece alrededor de un 50 a un 100%. Por lo tanto, se puede afirmar que el lapeado vibratorio debe ser aplicado como un lapeado preliminar o cuando los requerimientos de la calidad superficial sean bajos.

2.10 LIMPIEZA DEL AMBIENTE

El uso de abrasivos no contaminados, la limpieza superficial de la pieza y la del ambiente son muy importantes para el éxito del proceso de lapeado. El esparcimiento de partículas de polvo hacia las máquinas lapeadoras puede ocasionar daños en la pieza, como son: La formación de rayaduras, la generación de bordes irregulares y otros. Para asegurar un nivel de limpieza adecuado, se deben tomar en cuenta algunas consideraciones, como son: ubicar las máquinas de lapeado dentro de un "cuarto limpio", cubrir el área de trabajo de las máquinas, cuando no se utilicen; usar vestimentas que no desprendan pelusa, etc.

CAPITULO 3

DISEÑO DE UNA LAPEADORA CON UN COJINETE NEUMATICO

3.1 DESCRIPCION GENERAL DEL EQUIPO PROPUESTO

El diseño del prototipo de la lapeadora que se presenta en esta tesis corresponde al de una "máquina lapeadora para una cara", siendo que la principal característica de este tipo de máquinas es la presencia de un pulidor o plato rotatorio con eje vertical. La importancia del prototipo en cuestión radica en la innovación de incluir, en el acoplamiento entre el motor y el plato, la aplicación de un cojinete neumático, por lo que el prototipo en cuestión fue designado con el nombre de "Máquina Lapeadora con la aplicación de un Cojinete Neumático" ("MALCON").

Como se mencionó en el punto 1.2.5, este tipo de máquina se utiliza principalmente en el lapeado de superficies planas para una de las caras de la pieza de trabajo, pudiéndose incluir el lapeado para contornos de piezas de ensamble ubicados en un mismo plano y el lapeado de superficies paralelas.

El diseño de la "MALCON" está fundamentado en las dimensiones comerciales establecidas para las máquinas lapeadoras para superficies planas (Ver las tablas

A-1 y A-2 en el apéndice A). El equipo en descripción tiene un plato con un diámetro de 305 mm (12") y un arreglo de tres portapiezas del tipo de anillo con un diámetro interior de 108 mm (4¼"). Por lo tanto, esta máquina permite lapear superficies planas con diversos contornos siempre y cuando queden circunscritas en un área circular con un diámetro desde 6.4 mm hasta 100 mm (desde 1/4" hasta 4") para lo cual se requiere un intervalo de presiones que va de 0.8 a 16.52 kg/cm² (1 a 235 psi).

3.2 ESTRUCTURA DE LA MAQUINA

Antecedentes

Después de estudiar la información obtenida sobre máquinas lapeadoras comerciales con características similares a las de la "MALCON", se observó que la configuración básica de éstas, en esencia, está constituida en dos niveles. El primer nivel sirve para fijar el sistema de potencia de la máquina. El segundo nivel es una plataforma que se caracteriza por tener un barreno central destinado para el posicionamiento del plato y sobre la cual se colocan los mecanismos que guían a los portapiezas. La unión física de estos niveles puede ser de diversas formas, por ejemplo: Mediante el empleo de una carcasa de fundición en la cual se fija el motor y sobre la que se monta la cubierta que soporta a los mecanismos-guías de los anillos.

Descripción general

El diseño de la "MALCON" está formado por una estructura desarmable que sirve como soporte a los elementos y sistemas del prototipo, la cual está constituida por tres placas separadas y soportadas entre sí por medio de un juego de tres columnas rígidas entre cada nivel (Ver figura 3.1). El diseño de la estructura se hizo

atendiendo los siguientes aspectos: Un bajo costo, hablando en términos de un prototipo; fácil construcción; asegurar el funcionamiento adecuado de los elementos; versatilidad (p.e. un sistema de recolección independiente de la estructura de la máquina); y un fácil mantenimiento. A continuación se describen las características de cada nivel.

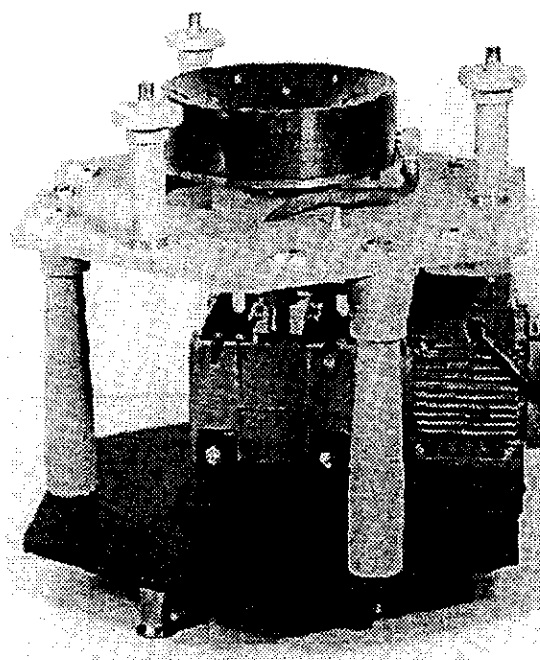


Figura 3.1 Estructura de la MALCON, la cual esta constituida por placas y columnas rígidas.

- El primer nivel es la plataforma principal de la máquina sobre la cual está fijado el sistema de transmisión que está constituido por un motorreductor de AC; a su vez, puede servir también como base para colocar algunos dispositivos requeridos para la instrumentación y control de la máquina. Este nivel está fabricado con una placa hexagonal de acero AISI 1020 (cold rolled), la cual tiene un radio inscrito de 475 mm (18 11/16"), un ancho entre aristas de 550 mm (21

5/8") y un espesor de 12.7 mm (1/2"). Sobre la superficie de esta placa se hicieron los siguientes maquinados: 3 barrenos roscados para fijar las columnas que soportan al segundo nivel, 3 barrenos roscados donde ensamblan los niveladores y un juego de 6 barrenos para fijar el juego de ángulos que sujetan al motorreductor.

- La función principal del segundo piso es la de constituir el soporte del cojinete neumático; así mismo, para aprovechar el espacio entre el diámetro exterior del cojinete y el perímetro de la placa, en ésta se colocó el sistema de recolección (tres contenedores) de los desechos abrasivos. Al igual que en el primer nivel, esta plataforma está hecha de placa del mismo material y dimensiones; por otro lado, en esta placa destacan los siguientes maquinados: un barreno central pasado por el cual se permite el paso de la flecha motriz; 3 barrenos pasados en los que ajustan los extremos del primer juego de columnas; 3 barrenos roscados destinados para fijar las columnas que soportan a la plataforma superior; y un juego de 4 barrenos que permiten fijar a los ángulos sobre los cuales se coloca la corredera del cojinete neumático.
- El último nivel es la cubierta superior de la máquina, cuya función principal es la de soportar los tres mecanismos-guías que posicionan y hacen rotar a los anillos sobre el plato. Esta cubierta está hecha de placa de acero inoxidable, con un ancho entre aristas de 560 mm (22") y un espesor de 12.7 mm (1/2"). En esta placa se realizaron los siguientes maquinados: un desbaste interno al centro de la placa con un ϕ 317.5 mm (12 1/2"), a través del cual pasa el plato de lapeado; 3 desbastes internos de ϕ 162 mm (6 3/8"), cuyos centros están en un mismo radio y quedan traslapados con el primer maquinado, con el fin de permitir el posicionamiento de los portapiezas; 3 barrenos pasados por los cuales pasan los extremos de las columnas que soportan a la cubierta; y 3 barrenos roscados donde ensamblan las columnas de los mecanismos-guías.

En cuanto a las columnas de la estructura, ambos juegos se maquinaron a partir de barras redondas de acero AISI 1020 (cold rolled) y se puede observar que éstas tienen una extensión superior de mayor diámetro que permite tener una mayor superficie de contacto, lo cual da mayor rigidez a la estructura.

Por otro lado, para proteger el sistema de potencia y los elementos de control colocados sobre la plataforma inferior y por motivos estéticos, se utilizó una carcaza que ajusta con la superficie superior de la placa intermedia y la superficie inferior de la placa del primer nivel. Esta carcaza está hecha de lámina de fierro cal. 20 y doblada en forma de un hexágono regular con una distancia entre vértices de 560mm (22").

En la figura 3.2 se señalan los elementos principales de la "Máquina Lapeadora con la Aplicación de un Cojinete Neumático".

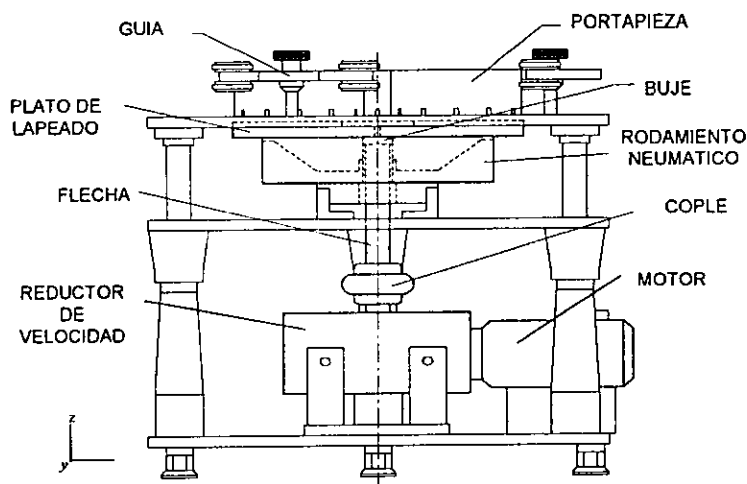


Figura 3.2 Esquema del prototipo de la Máquina para Lapear con un Cojinete Neumático.

3.3 DISEÑO DEL PLATO DE LAPEADO

Características geométricas

El pulidor es el elemento principal de una máquina de lapeado. El pulidor de la "MALCON" es un disco con superficies planas el cual tiene un diámetro exterior de 304.8 mm (12") y un espesor de 19 mm (3/4"). En el centro de la superficie superior del plato se maquinó una caja circular, lo cual limita la superficie de trabajo en forma de anillo cuyo ancho es de 114.3 mm (4 1/2"), es decir, es un poco mayor al diámetro interior del portapiezas. Por otro lado, en la caja de la cara superior se hizo un juego de 3 barrenos con caja para el paso de los tornillos que sujetan al plato con el elemento dinámico del cojinete. Adicionalmente, en la superficie inferior del plato, se maquinó una caja de ϕ 228.6 mm (9") que permite el centrado de la parte dinámica del cojinete neumático.

El diseño del plato de la "MALCON" tiene un arreglo de 16 ranuras radiales (igualmente espaciadas) maquinadas sobre su superficie de trabajo y una ranura concéntrica maquinada cercana al borde del plato. Cada ranura, vista en un corte transversal, presenta una sección en forma de "v" con una profundidad de 1 mm (5/128"). Estas ranuras se maquinaron con el objeto de poder introducir y distribuir en forma uniforme y aleatoria el abrasivo sobre toda la superficie del plato, así como para guiar los desechos; adicionalmente, se tiene que los platos ranurados son preferidos en el lapeado de superficies planas con grandes dimensiones longitudinales, para áreas planas con orificios sobre la superficie y en el lapeado final [3, 7, 19].

Selección del material y su justificación

El plato de la "MALCON" se construyó con hierro fundido ASTM 30 (3.25 a 3.4 %C y 2 %Si) con una dureza superficial de 180 a 240 H_{RB}. Se decidió utilizar hierro fundido,

en primer lugar, atendiendo a que es el material que con más frecuencia (99%) se emplea en las operaciones de lapeado (en particular, en el lapeado de superficies planas), ya que con este material se puede lapear con distintas clases de abrasivos en función de la dureza de la pieza de trabajo, permitiendo obtener un alto grado de exactitud en el producto [3, 19]; en segundo lugar, se puede observar que este material resulta muy económico respecto a otros. La elección de una clase particular de hierro fundido se hizo con base en la concordancia que existe entre las diversas referencias [7, 9, 19], de las cuales se puede resumir que el material debe tener una dureza dentro de un rango de los 80 a los 240 H_{RB} y una composición química con un %C= 3.4 y %Si= 1.81.

Por otro lado, el hierro fundido resulta ser un material muy adecuado para el proceso de lapeado, ya que la ferrita da la rigidez requerida mientras que el grafito que compone al hierro fundido actúa como lubricante y facilita el incrustamiento de los granos [9]. Así mismo, este material permite que el plato sea lo suficientemente rígido, y consecuentemente pesado, para evitar que éste sufra distorsiones en su uso y tenga una mejor resistencia al desgaste, lo cual está relacionado con la distribución de presión que actúa sobre la superficie del plato [19].

Características de la superficie de trabajo del plato

Debe recordarse que para lograr y asegurar la exactitud asociada al lapeado, se requiere que la superficie del plato sea un verdadero plano. Para cumplir con este requisito, durante el maquinado del plato se cuidó que sus caras formaran planos paralelos tomando como referencia al plano superior del elemento dinámico del cojinete neumático; así mismo, se rectificó posteriormente la superficie de trabajo del plato.

3.4 ELEMENTOS AUXILIARES PARA EL ACONDICIONAMIENTO DE LA PIEZA

Además del plato de lapeado, existen otros elementos que intervienen directamente en el acondicionamiento de la pieza; estos son los portapiezas y los dispositivos por medio de los cuales se aplica la presión necesaria que requiere la pieza para ser lapeada. Como se mencionó en el capítulo 1, a nivel comercial existen diferentes máquinas lapeadoras y por lo tanto se puede esperar que existan diferentes portapiezas y diversos medios para aplicar la presión. En el caso de la "MALCON" se utilizan portapiezas en forma de anillo y como medio para aplicar la carga se emplean "discos de presión".

3.4.1 Discos de presión

Los "discos de presión", como su nombre lo dice, son discos que son colocados en el interior del portapiezas con el objeto de presionar a la pieza contra la superficie de trabajo del plato; estos discos se pueden observar en la figura 3.3. Para obtener la presión más adecuada a las condiciones de un trabajo particular en función del área que se vaya a lapear (A_c), se apilan discos del mismo diámetro pero de distintos espesores como si se tratase de pesas.

Resulta importante decir que los discos deben ajustar suavemente con el diámetro interior del anillo con el fin de que ambos giren conjuntamente; así mismo, se debe asegurar un contacto uniforme entre las superficies involucradas de los distintos elementos (discos, pieza de trabajo y plato).

El sistema de los "discos de presión", por cada portapiezas, está formado por tres elementos, los cuales son: una base, un disco de ajuste y los discos intercambiables. La base, a su vez está formada por un disco de acero AISI 1020 (cold rolled) con un $\phi 106.4$ mm (4 3/16") y un espesor de 5 mm, en cuyo centro se

maquinó un barreno roscado pasado que permite fijar (por medio de soldadura) un espárrago, el cual sirve como guía de los otros elementos. El disco de ajuste se fabricó con "nylamid, tiene un diámetro de 108 mm con un espesor de 20 mm y un barreno roscado central pasado; este elemento se introduce en la guía de la base, quedando colocado entre el disco de la base y los discos intercambiables, permitiendo la alineación en un plano horizontal del disco de la base con respecto a la pieza de trabajo, así como también el centrado y ajuste del juego de discos con el diámetro interior del portapiezas para hacer que aquéllos giren junto con éste. Los discos intercambiables están fabricados de acero AISI 1020 y tienen el mismo diámetro que el disco de la base e igualmente en éstos se maquinó un barreno roscado en su centro; estos discos se maquinaron en diferentes espesores (5.5 y 11.5 mm) para obtener la presión requerida mediante diferentes combinaciones de ellos.

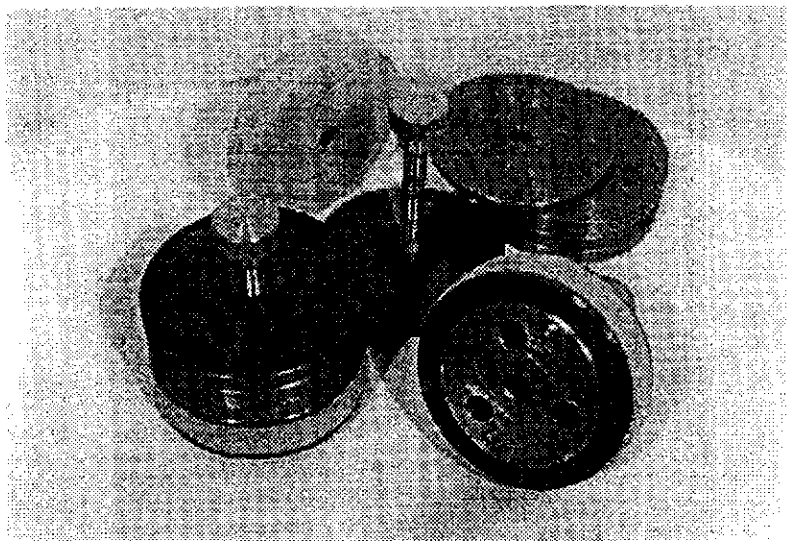


Figura 3.3 Elementos de los discos de presión.

3.4.2 Portapiezas

La función del portapiezas consiste en mantener a la pieza por lapear dentro de la superficie de trabajo del plato, y hacer que la pieza (junto con los discos de presión que están colocados sobre de ésta) adquiera un movimiento de rotación alrededor de su propio eje. Los portapiezas tienen forma de anillo con un diámetro interior de 108 mm (4 1/4") y un ancho de pared de 14.3 mm (9/16"); siendo que se escogió esta última dimensión para evitar la colisión entre los anillos y a la vez para ofrecer una rigidez adecuada al portapiezas. Tomando en cuenta que no hay un límite de la altura que deba tener la pieza por ser lapeada y al observar que en la práctica hay piezas muy altas (p.e. 4") que requieren lapearse, el anillo tiene una altura de 63.5 mm (2 1/2"), lo cual posibilita el lapeado de piezas con una altura de hasta 50.8 mm (2"). Al igual que en el diseño del plato de lapeado, la pared de los anillos cuenta con 12 ranuras radiales y con un corte transversal en forma de rectángulo, cuya finalidad es permitir una distribución uniforme y aleatoria de la mezcla abrasiva. Los portapiezas se fabricaron con acero AISI 1035 ya que este material tiene una dureza superior a la del plato, evitándose así un inadecuado incrustamiento de los granos abrasivos. Adicionalmente, este material ofrece un peso adecuado al anillo para que pueda ser impulsado por el plato y a la vez pueda mantener una posición más estable (sin brincoteos) dentro de la banda de trabajo.

Por otro lado, se rectificó la superficie del portapiezas que está en contacto con la del plato. Con esta acción se pretende reducir el desgaste de los mismos anillos y del plato y conservar una superficie de trabajo que no presente distorsiones (falta de planicidad).

En la figura 3.4 se puede observar los portapiezas de tipo anillo que utiliza la MALCON.

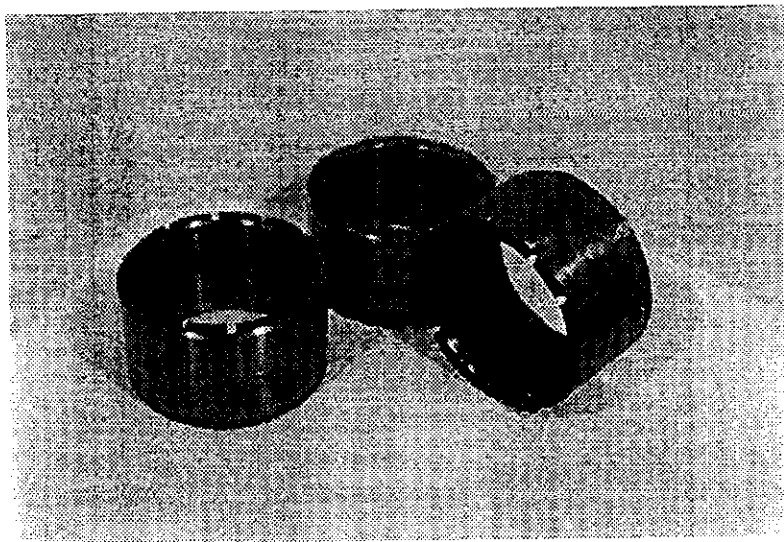


Figura 3.4 Portapiezas de la MALCON.

3.5 MECANISMOS DE POSICIONAMIENTO DE LOS PORTAPIEZAS

La función de los mecanismos-guías consiste en hacer girar a los portapiezas, manteniendo sus ejes en una posición determinada respecto a la superficie de trabajo del plato; de este modo, cada anillo es separado, ajustado e impulsado por medio de una guía. Estos mecanismos están ubicados cada 120° sobre la cubierta superior de la máquina y están apoyados individualmente en una columna. En la figura 3.5 se puede observar una fotografía del mecanismo en cuestión.

Cada mecanismo-guía está formado por una placa de latón con un espesor de 6.4 mm ($1/4"$), la cual tiene una forma similar a la de una "A". En cada una de las "extremidades" se insertó un eje y un par de rodillos, quedando uno por arriba y otro por debajo de la placa. El diseño de los rodillos consta de una rueda de latón de $\phi 33$ mm x 12 mm; en el centro de esta rueda se maquinó una caja en donde se montó

un rodamiento rígido de bolas, el cual se acopla en los ejes antes mencionados; adicionalmente, esta rueda tiene una ranura maquinada en su canto en la cual está colocado un *o´ring*. La justificación de emplear un *o´ring* se basó en que este elemento es el que está en contacto directo con el anillo, de tal modo que permite absorber el choque del anillo debido al impulso recibido por el plato y a la vez proporciona la fricción necesaria para hacer girar al portapiezas. La aplicación del rodamiento se justifica principalmente por tener una baja fricción, lo cual permite que el rodillo gire constantemente.

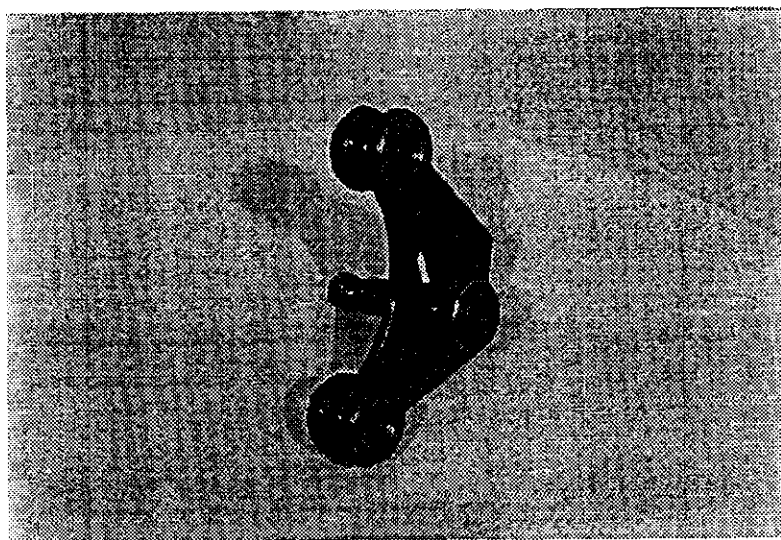


Figura 3.5 Mecanismo para guiar y posicionar a los portapiezas.

Por otro lado, la ranura en la placa permite el asentamiento de ésta sobre una columna; así como también hace que la placa tenga un desplazamiento en la dirección radial del plato y que pueda girar alrededor del eje de la columna; lo cual posibilita el correcto posicionamiento del portapiezas sobre el plato mientras se efectúa el proceso y además, permite el acondicionamiento previo del plato antes

de cada operación. Este mantenimiento consiste en colocar uno o más portapiezas en una determinada posición respecto de la superficie de trabajo con el fin de corregir la superficie (cóncava, convexa o mixta) que se haya generado por el desgaste del plato.

3.6 COJINETE NEUMATICO

Antecedentes

Con base en las características del cojinete neumático descrito por Reséndiz [12, 13], el cual se diseñó originalmente como parte de un dinamómetro para la medición de la potencia suministrada en tanques agitados, se planteó un nuevo diseño de un cojinete de aire para ser utilizado en el prototipo de la máquina lapeadora que se describe. Este cojinete neumático tiene la función de mantener "flotando" el plato de lapeado junto con los elementos (piezas para lapearse, discos de presión y portapiezas) que estén colocados sobre su superficie; de este modo, al eliminar prácticamente el efecto de la fricción se logra que el plato gire libremente y a la vez con esto se pretende evitar desalineamientos del plano de trabajo.

Funcionamiento de un cojinete neumático

El funcionamiento del cojinete neumático se basa en el principio de crear un colchón de aire entre las partes estática y dinámica que componen al mismo, por medio de aire inyectado a presión dentro de la parte estática y que escapa por espreas aspersoras de tal manera que a su salida, éste levanta la parte dinámica y la mantiene flotando mientras haya aire escapando.

Parámetros de diseño del cojinete neumático de la "MALCON"

Para el diseño del cojinete se consideró en primer lugar la estabilidad del plato y en segundo término su capacidad de carga.

a) Estabilidad

Para satisfacer este requisito, se optó por utilizar un cojinete cuyos elementos acoplan entre sí por medio de una superficie cónica, con lo cual se obtienen fuerzas equilibrantes radiales en un mismo plano; así mismo, con respecto al diseño de Reséndiz, se incrementó el número de espreas ubicadas en la superficie cónica y a la vez se colocaron alternadamente en dos niveles, con el objeto de tener un mayor número de planos de alineamiento. Por otro lado, de acuerdo con [15], se maquinó una caja alrededor de las salidas de las espreas que permiten la formación de una película de aire más uniforme.

b) Capacidad de carga

La capacidad de carga de un cojinete está relacionada con el área de contacto entre las partes que lo componen; así se observa que el cojinete diseñado por Reséndiz, de acuerdo con los resultados mostrados en [13] puede soportar una carga de 1048 N. Por otro lado se tiene que la aplicación del nuevo cojinete requiere soportar cargas menores (aproximadamente de 600 N) con lo cual se podrían reducir sus dimensiones; sin embargo, el incremento del número de espreas sobre la parte cónica y su ubicación en dos líneas, requirió aumentar el área de la superficie cónica. Por lo tanto, se procuró que las dimensiones del cojinete de la MALCON fueran similares a las del cojinete antes señalado con el objeto de obtener un valor de carga que asegurara soportar el peso requerido. En el apéndice B se presentan los cálculos para determinar la carga teórica que puede soportar el cojinete de la MALCON.

Descripción de los elementos del cojinete neumático de la "MALCON"

El nuevo cojinete, en conjunto, tiene un diámetro de 228.6 mm (9") y una altura de 76.2 mm (3") y está compuesto por las dos partes antes mencionadas: La parte estática (inferior), la cual está fijada a la estructura de la máquina; y la parte dinámica (superior) que es totalmente independiente de la primera y está acoplada al sistema de potencia y sobre la cual está fijado el plato de lapeado. Estas dos partes ajustan entre sí por medio de una superficie cónica que tiene un ángulo de asentamiento de 30° respecto al eje x (Ver sistema de referencia en la fig. 3.2).

a) El elemento dinámico es un disco de acero H13 nitrurado de ϕ 228.6 mm y un espesor de 38.1 mm, el cual está biselado por su parte externa a 30° a partir de 6.35 mm desde su extremo superior hasta formar un plano horizontal de ϕ 115.3 mm en la parte inferior de la pieza.

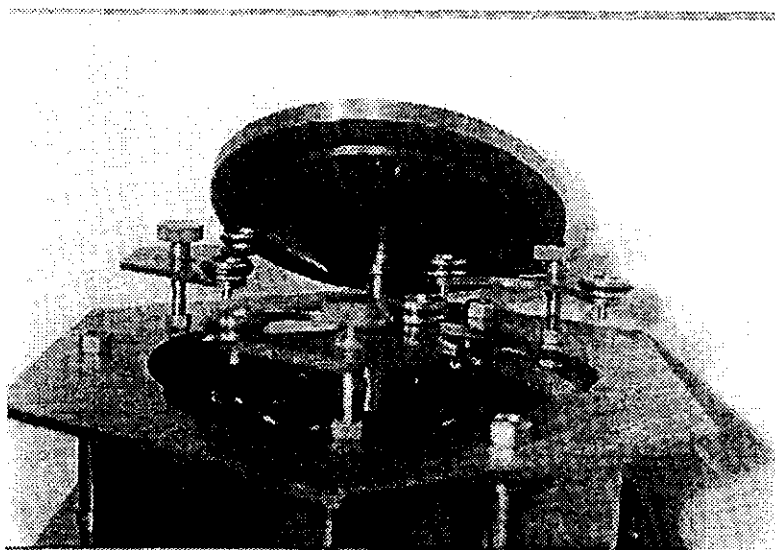


Figura 3.6 Vista del elemento dinámico del cojinete neumático de la MALCON, sobre el cual se ha ensamblado el plato y la flecha de transmisión.

En esta pieza se hicieron también los siguientes maquinados: 3 barrenos roscados ciegos, ubicados en la cara superior, en donde se afianzan los tornillos que fijan al plato con la pieza en cuestión; una caja de ϕ 50.8 mm (2") x 28.5 mm, localizada en el centro de la parte inferior, la cual sirve para introducir el buje que acopla al elemento descrito con la flecha motriz, de lo cual se hablará posteriormente. En la figura 3.6 se presenta la parte dinámica del cojinete fijada con otros elementos de la máquina.

b) La parte estática del cojinete neumático está a la vez formada por tres piezas, las cuales son: El elemento cónico, la corona y la base de la parte estática. A continuación se describe cada uno de éstos.

- El elemento cónico está fabricado a partir de un anillo de acero H13 nitrurado con un diámetro exterior de 225 mm, un diámetro interior de 31.75 mm y un espesor de 63.5 mm. Esta pieza fue biselada por su parte interior a 30°, partiendo desde el borde de la cara superior, formándose así una superficie inclinada que se une con un superficie horizontal de ϕ 115.3 mm, para coincidir con la parte dinámica. En el interior de la pieza hay una cavidad que forma superficies paralelas a las que están en la parte superior.

En esta pieza destacan los siguientes maquinados: Sobre la superficie biselada de la parte superior se encuentran 12 barrenos pasados con una caja de ϕ 19 mm x 1.6 mm destinados al alojamiento de espreas; sobre la superficie horizontal de la misma cara están distribuidos 6 barrenos pasados con una caja de ϕ 12.7 mm x 1.6 mm, para la misma finalidad.

Adicionalmente, en la superficie horizontal de la cara inferior se maquinaron dos cajas concéntricas, una destinada al ensamble de la corona con el estator y otra para colocar un *o'ring* que permite el sellado entre estas dos piezas. En la base de la pared se maquinaron 6 barrenos roscados ciegos que permiten fijar la pieza

en cuestión con la base de la parte estática. Finalmente, en el exterior de la pieza se hicieron dos barrenos cónicos roscados NPT destinados para la línea neumática.

- La corona del elemento estático es un anillo de acero AISI 1018 (cold rolled) que tiene un diámetro exterior de 63.5 mm (2 1/2"), un diámetro interior de 31.8 mm (1 1/4") y una altura de 25.4 mm (1"). En el plano horizontal central de esta pieza se maquinó un juego de 6 barrenos para alojar espreas. Adicionalmente, en la cara inferior de la pieza se maquinó una caja y un juego de 6 barrenos roscados que permiten ensamblar la corona con la base de la parte estática; así mismo, en la cara superior de la pieza se maquinó una caja en la cual ajusta el estator.
- La base de la parte estática es un disco de acero AISI 1018 (cold rolled) de $\phi 225$ mm, con un espesor de 12.7 mm y que tiene un barreno central pasado de $\phi 31.8$ mm. En la cara superior de esta pieza se pueden observar los siguientes maquinados: dos escalones concéntricos que parten del borde, en uno de los cuales asienta la pared del estator y en el otro se introduce un *o'ring* para sellar la unión de este elemento; 2 cajas concéntricas en las que ajusta la corona y se aloja un *o'ring*. En la cara inferior se tienen los siguientes maquinados: un juego de 6 barrenos pasados a través de los cuales se introducen los tornillos que fijan la base con el estator; un juego de 6 barrenos por los que pasan los tornillos que unen la corona con la base; un par de barrenos cónicos roscados destinados para la línea neumática; un juego de 4 barrenos roscados que sirven para fijar la parte estática del cojinete con la corredera, la cual asienta sobre los ángulos fijados en la placa del segundo nivel.

En la figura 3.7 se puede observar el ensamble de la parte estática del cojinete neumático.

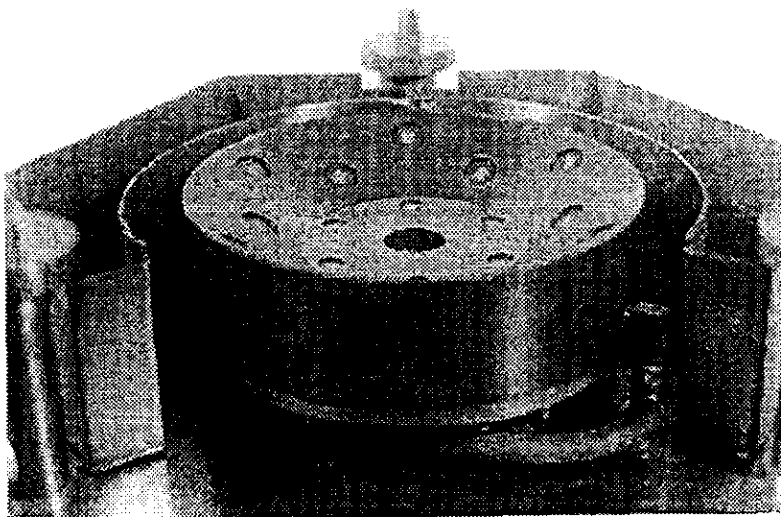


Figura 3.7 Vista de la parte estática del cojinete neumático de la MALCON.

c) Por otro lado, todas las espreas mencionadas anteriormente, están formadas por cilindros de latón de ϕ 6.4 mm (1/4") y una altura de 6 mm, en los cuales se hicieron barrenos en su centro para dejar un agujero pasado de ϕ 0.3 mm a la salida y de ϕ 1.5 mm a la entrada.

En la figura 3.8 se presenta un diagrama del ensamble de los elementos que constituyen al cojinete neumático de la "MALCON".

Línea neumática del cojinete neumático de la "MALCON"

El aire a presión pasa en primer lugar a través de un separador, para eliminar el exceso de humedad que pudiera dañar las partes del cojinete. A continuación la línea de alimentación se divide en dos ramas, por lo que el aire es introducido en la cavidad interior de la parte estática por medio de las dos entradas de 1/4 NPT que

están ubicadas en la pared lateral de éste y colocadas cada 180° , con el fin de obtener una distribución más uniforme del aire. Por otro lado, en la base del elemento estático se encuentran dos salidas independientes que permiten regular el flujo de aire por medio de una válvula.

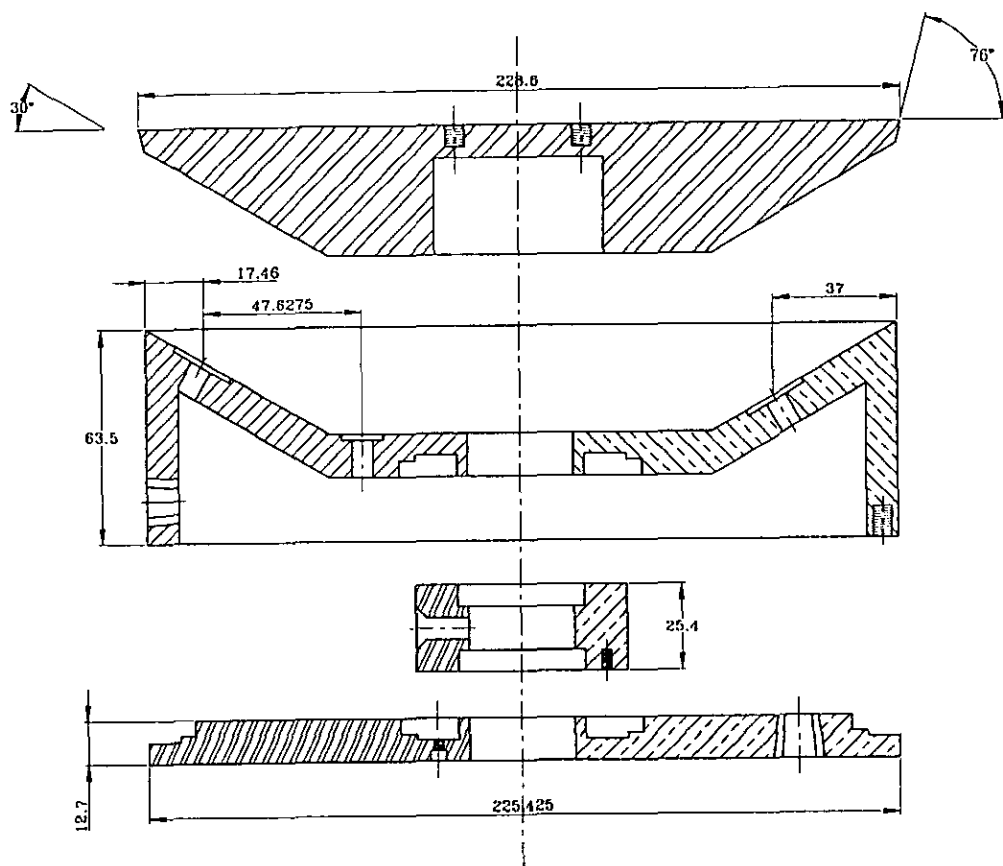


Figura 3.8 Diagrama y dimensiones (milimétricas) de los elementos del cojinete neumático de la "MALCON".

En el diseño del cojinete de Reséndiz [12,13] se puede observar que en el interior del elemento estático se maquinaron canales independientes que permiten guiar el

flujo de aire. En cambio, en el elemento estático del nuevo cojinete se optó por maquinar una cámara de aire común por la que fluye el aire hacia todas las espreas. A continuación se presenta la clasificación y características de las espreas que constituyen las salidas de la línea neumática.

a) Espreas de flujo mixto

El elemento estático tiene doce espreas sobre la superficie cónica, alternadas cada 30° y distribuidas en dos alturas distintas. Estas espreas están colocadas a 30° de inclinación con respecto al plano horizontal, por lo que el aire proporciona una fuerza de empuje perpendicular a la superficie cónica del elemento estático, la cual se puede descomponer en una componente horizontal (radial) y una vertical (axial); con este efecto se logra que el elemento dinámico, por consiguiente el plato, pueda ser alineado en un plano xy.

b) Espreas para flujo axial

La superficie horizontal del elemento estático (estator) tiene seis espreas igualmente espaciadas; por lo que al salir el aire a través de éstas, produce una fuerza axial aplicada directamente sobre la superficie plana del elemento dinámico. Las fuerzas generadas por este tipo de espreas junto con las componentes axiales de las espreas mixtas, permiten levantar el elemento dinámico del cojinete.

c) Espreas para empuje radial

En la corona del elemento estático se colocaron seis espreas, en una posición radial e igualmente espaciadas. De este modo, el aire que fluye a través de éstas desemboca en la cavidad por donde pasa la flecha hacia el elemento dinámico, proporcionando una fuerza radial que permite centrar el giro de la flecha.

3.7 SELECCION DEL MOTOR

El sistema motriz de la "MALCON" está formado por un motorreductor, el cual tiene las siguientes características: 4 polos, 373 W ($\frac{1}{2}$ HP) y una relación de velocidad de 5:1, obteniéndose una velocidad de salida máxima de 337 rpm. Los criterios que llevaron a seleccionar este motor son los siguientes:

-Velocidad. Para elegir la velocidad de salida se tomó en cuenta que el lapeado es un proceso a baja velocidad. De acuerdo con la diversas bibliografías [2,3,4,6], se observa que es común utilizar velocidades menores a las 350 rpm.

- Potencia. Para elegir la potencia del motor, se consideró el torque que se requiere para hacer girar al plato junto con el elemento dinámico del cojinete, y los elementos (piezas, portapiezas, discos de presión) que estén colocados sobre la superficie del primero. En el apéndice B se presentan los cálculos que llevaron a seleccionar el motor anteriormente descrito; de acuerdo con éstos se requiere una potencia teórica de 96.72 W (0.13 HP) sin considerar pérdidas por fricción, desalineamiento, etc., por lo que al trabajar con un motor de 373 W se tiene un factor de seguridad de 3.84.

3.8 ACOPLAMIENTO DEL SISTEMA MOTRIZ

El sistema motriz de la máquina consta de tres elementos principales, los cuales son: el motorreductor, el cojinete neumático y el plato de lapeado. Para transmitir el giro del motor al elemento dinámico y por consiguiente al plato de lapeado, la flecha del motorreductor se acopló una flecha motriz que se hace pasar a través del elemento estático del cojinete neumático y en su extremo se acopla por medio de un buje roscado de latón con la parte dinámica del cojinete.

Para el acoplamiento entre la flecha del motorreductor y la flecha motriz se fabricó un cople a partir de una barra de latón de $\phi 1\frac{1}{2}$ " (38.1 mm) a la cual se le hizo un barreno central pasado de $\phi 7/8$ " con tolerancia de ajuste con juego, así como el canal para las cuñas de las flechas. De este modo, por un extremo se fija la flecha del motorreductor por medio de un opresor, y en el otro ajusta libremente la flecha motriz. Este cople proporciona un desalineamiento angular y un desplazamiento axial de la parte dinámica del cojinete; en otras palabras, permite el levantamiento del elemento dinámico y genera un juego entre las superficies de los elementos del cojinete con lo cual el elemento dinámico pueda girar levemente alrededor del eje x y del eje y . Esta holgura no debe ser muy grande ya que la película de aire formada entre los elementos estático y dinámico es pequeña (10 a 40 μm), lo cual anularía el efecto del cojinete sobre el plato. Al tener estos movimientos angulares, aunque restringidos, se permite que la película de aire actúe tanto axial como radialmente en el elemento dinámico del cojinete, obteniéndose la correcta alineación del plato en el plano xy .

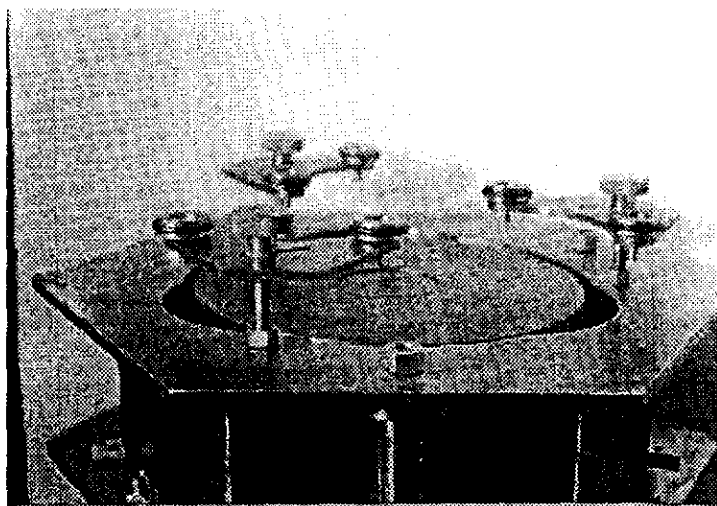


Figura 3.9 Area de trabajo de la MALCON.

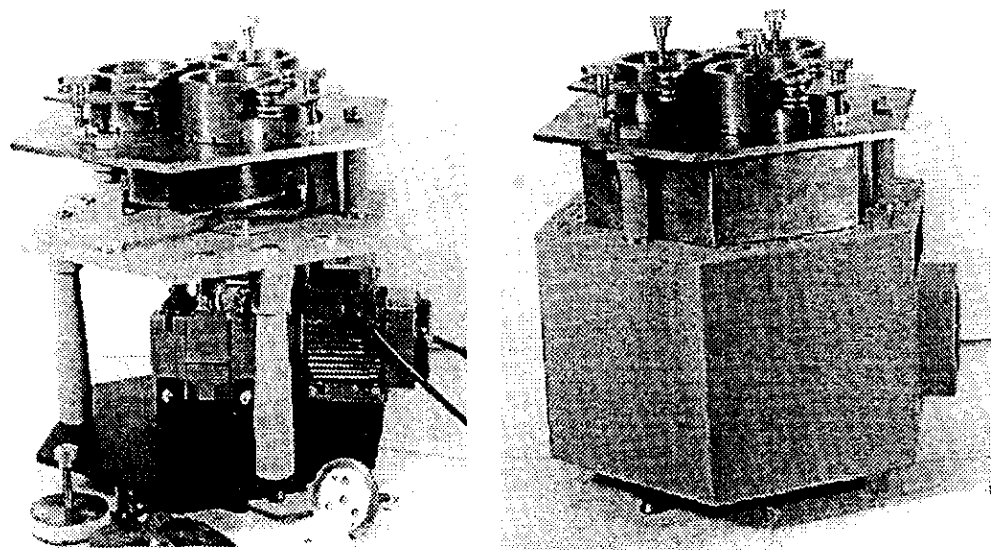


Figura 3.10 Máquina Lapeadora con la aplicación de un Cojinete Neumático

3.9 AUTOMATIZACION DE LA "MALCON"

De acuerdo con la clasificación de máquinas lapeadoras, la "MALCON" se puede catalogar como una máquina semiautomática, dentro de su primera fase. Sin embargo, existen varias opciones de instrumentación y control que pueden ser

aplicadas en la automatización de la "MALCON" en una segunda etapa, las cuales son las siguientes:

- *Sistemas de alimentación de abrasivos.* Son sistemas comerciales de bombeo de fluidos que permiten el suministro automático de la mezcla abrasiva.
- *Temporizadores.* Estos dispositivos son usados principalmente cuando se tiene una producción de piezas similares. El modo en que operan estos dispositivos es por medio de programar un lapso de tiempo bajo el cual esté funcionando la máquina, obteniéndose así la remoción de material calculada para un tiempo preestablecido.
- *Medidores del nivel de los discos de presión.* Son dispositivos electrónicos por medio de los cuales se pueden obtener mediciones de la altura e inclinación de los discos de presión, lo cual se relaciona respectivamente con la cantidad de material removido y el aseguramiento de planicidad de la pieza.

CAPITULO 4

CARACTERIZACION DE LA “MALCON”

4.1 CLASIFICACION DE PRUEBAS

Para estudiar el funcionamiento del prototipo en cuestión se diseñaron diferentes pruebas que se pueden clasificar en tres clases. Las pruebas correspondientes a la primera categoría se definieron como "Pruebas de funcionamiento del cojinete neumático de la "MALCON" " y buscan determinar las condiciones de operación de este elemento. Las pruebas de la segunda categoría se designaron como "Pruebas del comportamiento de los parámetros de lapeado" y con éstas se pretende encontrar los valores óptimos de los diferentes parámetros que permiten obtener las tolerancias dimensionales recomendadas para superficies lapeadas. Finalmente, las "Pruebas para valorar la influencia del cojinete neumático en el proceso de lapeado" tienen como objetivo comparar los resultados que se obtienen al lapear una superficie con y sin la presencia del cojinete neumático en la máquina lapeadora en cuestión.

4.2 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL COJINETE NEUMATICO DE LA MALCON

Una vez que se concluyó con la fabricación del cojinete neumático, éste se sometió a diferentes pruebas para evaluar las condiciones bajo las cuales opera. A continuación se describen en qué consisten dichas pruebas y los resultados obtenidos.

Prueba de la presión mínima de libre giro

Esta prueba tiene la finalidad de determinar la presión mínima requerida para que la parte dinámica gire libremente sobre la estática; por lo tanto es necesario que ésta sea realizada sin que el cojinete esté acoplado al sistema motriz. La prueba consiste en que, una vez suministrado aire a presión en la parte estática, se controla la presión de alimentación mediante un regulador con manómetro integrado desde cero hasta obtener la presión mínima que permita el libre giro de la parte dinámica sobre la parte estática, lo cual se logra a la vez por medio de aplicar una pequeña fuerza tangencial en el plato. Debe mencionarse que en esta prueba, el peso que soportó el cojinete fue la suma del peso de su parte dinámica más el peso del plato.

El resultado de esta prueba indica que se deben de utilizar valores de presión superiores a 0.7 kg/cm^2 para obtener el libre giro. Por otro lado, se observó que el elemento dinámico junto con el plato permanecen girando constantemente después de haberse iniciado el movimiento; por lo tanto se puede concluir que las espreas proporcionan una distribución de aire uniforme entre las partes dinámica y estática del cojinete.

Prueba de colchón de aire mínimo

Con esta prueba se busca determinar el espesor mínimo de la película de aire sobre la cual puede girar libremente la parte dinámica, y consiste en medir la diferencia entre la altura original de la parte dinámica cuando no hay suministro de aire y la altura de la misma pieza cuando se presenta el libre giro, para lo cual se utilizó un calibrador de alturas electrónico. En esta prueba la única carga que soportó el cojinete fue el peso de su parte dinámica.

De acuerdo con las mediciones realizadas, se tiene que el colchón de aire mínimo tiene un espesor de $24\text{ }\mu\text{m}$. En la figura 4.1 se presenta el arreglo que se hizo para medir el espesor del colchón de aire.

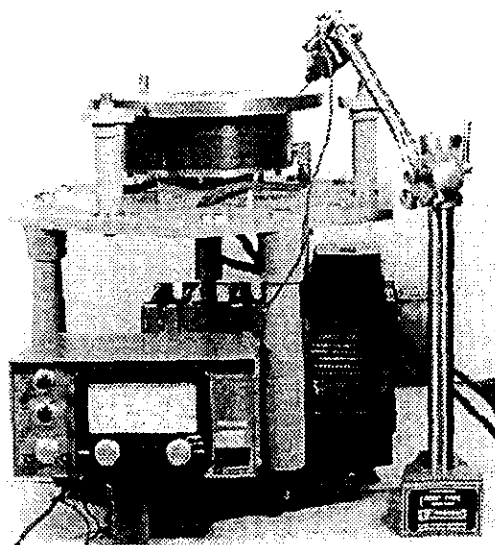


Fig. 4.1 Arreglo para la prueba de colchón de aire mínimo en el cojinete neumático de la MALCON.

Prueba de carga máxima

El objetivo de esta prueba es determinar el peso real que puede levantar el cojinete neumático, independiente del sistema motriz. Para esta prueba se suministró aire dentro de la parte estática del cojinete con una presión de 5 kg/cm^2 y a continuación se fue incrementando la carga de 10 en 10 kg, adicionales al peso de la parte dinámica y del plato, al mismo tiempo que se hacía girar la parte dinámica para asegurar la presencia del libre giro. Los resultados de esta prueba señalan que el cojinete de la MALCON puede soportar una carga máxima superior a los 80 kg sin que haya alteraciones en el funcionamiento del cojinete neumático. En la figura 4.2 se presenta el arreglo que se empleó para determinar la carga máxima del cojinete en cuestión.

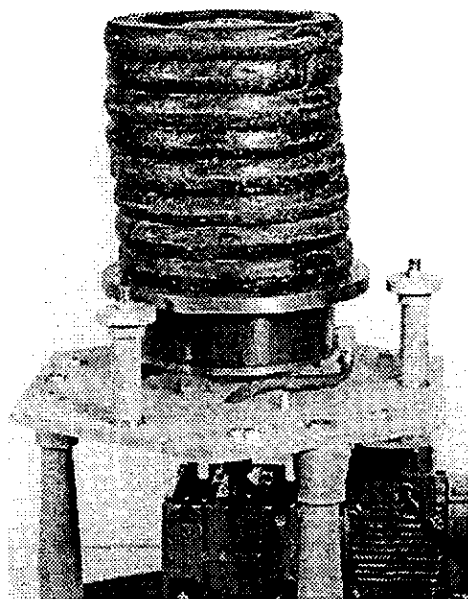


Fig. 4.2 Prueba para determinar la carga máxima que puede soportar el cojinete neumático de la MALCON.

4.3 PRUEBAS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS PARAMETROS DEL LAPEADO

Como se mencionó en el capítulo 2, en el proceso de lapeado existen diversos parámetros que deben tomarse en cuenta para obtener los mejores resultados, así mismo se debe recordar que no se han realizado estudios profundos que permitan asociar datos numéricos a esos parámetros para un trabajo en particular. Por lo tanto, se consideró que era necesario la aplicación de algunas pruebas que permitieran entender el proceso de lapeado desde un punto de vista más práctico.

Para simplificar las pruebas y obtener resultados útiles, se optó por estudiar el efecto de los parámetros que se considera influyen más notoriamente en el lapeado. De este modo, en estas pruebas se analizó la influencia que tiene la variación de la presión (p), el uso de distintos tamaños de grano abrasivo (a) y el tiempo de lapeado (t) sobre la calidad superficial (R_m) y la remoción de material (Q), esta última relacionada con la pérdida de dimensiones (L). Por lo tanto, en estas pruebas se mantuvieron constantes los siguientes parámetros o condiciones de lapeado: las características de las piezas de trabajo, las propiedades del plato, la velocidad de lapeado, los componentes de la mezcla, el grado de concentración y la dosificación de la mezcla abrasiva.

a) Condiciones de lapeado constantes

Como se señaló anteriormente, se decidió mantener constantes algunos parámetros o condiciones que influyen en el lapeado, los cuales son los siguientes:

Características de las probetas

Para las distintas pruebas que se realizaron para estudiar el efecto de los parámetros de lapeado antes mencionados, se utilizaron probetas con un diámetro de 12.7 mm (1/2") de acero AISI 1045 el cual tiene una dureza de 26-30 H_{RC}.

This image shows a highly textured, high-contrast surface, likely a book cover or endpaper. The texture is characterized by dense, horizontal, wavy lines and a mottled pattern of black and white, giving it a grainy, almost abstract appearance. There are no discernible figures, objects, or text.

DATE	OPERATOR	PART-PROCESS	DATE	OPERATOR	PART-PROCESS
TEST CONDITIONS		PARAMETER	MAXIMUM	AVERAGE	MINIMUM UNITS
CUTOFF	0.8 MM	RA	2.2	1.6	0.9 UM
DRIVE SPEED	0.25 MM/SEC	RO	2.8	2.0	1.3 UM
CHAMF LENGTH	1	RY	11.8	9.5	7.5 UM
TRAVERSE LENGTH	2.90 MM	RZ	8.2	6.4	5.4 UM
UNITS	METRIC				
POLARITY	NORMAL				

4.3 Características superficiales de una probeta de 1045 templada, revenida y rectificada.

Características del plato

Como se describió en el punto 3.3, el plato de la "MALCON" está fabricado con fundición de hierro ASTM 30 y con una dureza de 180 a 240 H_{RB}. La superficie del plato se rectificó y se le maquinó un arreglo de ranuras radiales y angulares.

Selección de los componentes de la mezcla

Para las pruebas en cuestión se optó por trabajar únicamente con alúmina blanca ya que proporciona diversas ventajas, como son: fácil adquisición, un costo relativamente bajo respecto a otros polvos abrasivos o mezclas abrasivas, y además, de acuerdo con [3, 19], resulta ser adecuado para lapear el material de las probetas (Ver tablas A-3 y A-4 del apéndice B). Por otro lado, como vehículo se empleó aceite para lubricación de maquinaria "Mobil DTE-26" ya que tiene las siguientes ventajas: es un aceite ligero que permite diluir el abrasivo fácilmente, permite la formación de una película uniforme que cubre toda la superficie del plato y permanece adherido durante un lapso de tiempo mayor, en comparación con otros aceites.

Grado de concentración de la mezcla abrasiva

En el punto 2.4.3 se estudió el efecto que tiene el grado de concentración de la mezcla abrasiva sobre la remoción de material y la calidad superficial, y de acuerdo con los resultados obtenidos por Matsunaga [3] se puede concluir que la mezcla tiene un comportamiento óptimo cuando está compuesta entre 10% y 30% de abrasivo; por lo que para estas pruebas se estableció que la mezcla abrasiva tuviera siempre el mismo grado de concentración, y se optó por trabajar con una relación abrasivo:aceite de 15:85. Cabe señalar que para asegurar una correcta disolución del abrasivo en el aceite, los componentes se mezclaron con una máquina de ultrasonido.

Dosificación de la mezcla abrasiva

De acuerdo con lo presentado en el capítulo 2.4, se puede observar que resulta más práctico tener una alimentación continua de la mezcla abrasiva o que sea dosificada en períodos cortos de tiempo. Por lo tanto, para los diferentes tiempos de lapreado se optó por dosificar la mezcla en intervalos de cada 5 minutos durante 5 segundos.

Velocidad del pulidor

En el punto 2.8 se mencionó que la velocidad de lapreado está relacionada con la velocidad del pulidor y que es un parámetro que permite controlar Q y R_m , sin embargo, su efecto se puede compensar con el tiempo del proceso. De este modo, para la realización de las pruebas se decidió fijar la velocidad de rotación del pulidor a 300 rpm tomando como referencia que en las bibliografías [3, 9, 19] se indica que la velocidad del plato está en un rango de 200 a 350 rpm.

Condiciones de limpieza

Tal como se mencionó en el punto 2.10, se debe cuidar que el proceso de lapreado sea efectuado en un ambiente limpio. Para lograr obtener resultados favorables, las pruebas en cuestión se efectuaron tratando de mantener las mejores condiciones de limpieza en todos los aspectos.

b) Condiciones de operación variables

Variación de la presión

Para determinar el efecto que se tiene sobre Q y R_m al variar la presión (p), se estableció lappear probetas sometiendo a distintas cargas.

Se debe recordar que para aplicar y variar la presión se utilizan los "discos de presión", los cuales constan de un disco base " d_b " cuyo peso es 4.8 N (0.49 kg) y un juego de tres discos intercambiables, dos de los cuales pesan 7.75 N (0.79 kg) y serán identificados como " d_1 " y un disco " d_2 " con un peso de 3.73 N (0.38 kg). A continuación se presentan los valores de presión asociados para una probeta de ϕ 12.7 mm (1/2") que se pueden obtener al combinar estos discos.

Combinación de discos	W_{tot} [N] (kg)	$A_{cl} = \pi\phi^2/4$ [cm ²]	$\rho = W_{tot}/A_{cl}$ [kg/cm ²]
d_b	4.80 (0.49)	1.27	$\rho_a = 0.4$
$d_b + d_1$	8.53 (0.87)	1.27	$\rho_b = 0.7$
$d_b + d_2$	12.55 (1.28)	1.27	$\rho_c = 1.0$
$d_b + d_1 + d_2$	16.28 (1.66)	1.27	$\rho_d = 1.3$
$d_b + d_2 + d_2$	20.30 (2.07)	1.27	$\rho_e = 1.6$
$d_b + d_1 + d_2 + d_2$	78.13 (2.56)	1.27	$\rho_f = 2.0$

Para las pruebas en cuestión se trabajó solo con tres presiones, las cuales son las siguientes: $P_1 = 0.4 \text{ kg/cm}^2$, $P_2 = 1.0 \text{ kg/cm}^2$ y $P_3 = 1.6 \text{ kg/cm}^2$.

Diferentes tamaños de grano

Para evaluar el efecto del tamaño de grano (a) sobre Q y R_m se utilizaron dos diferentes tamaños de alúmina blanca calcinada, los cuales son 5 μm (No. 12) designado como a_1 , y de 1 μm (No. 13) identificado como a_2 .

Influencia del tiempo de lapeado

Como se mencionó en el capítulo 2, el tiempo de lapeado está directamente relacionado con el comportamiento de los demás parámetros (presión, tamaño y

dureza de grano, grado de dosificación, etc.), en otras palabras, el efecto de estos últimos varía conforme transcurre el tiempo de duración del proceso. Por lo tanto, en las pruebas propuestas se estudió el efecto de la variación de la presión (p) y de los distintos tamaños de grano (a) sobre la cantidad de material removido y la calidad superficial para diferentes intervalos de tiempo (τ). Los intervalos de tiempo que se eligieron para el abrasivo a_1 fueron de 30, 60 y 120 minutos; y conociendo de antemano que un tamaño de grano pequeño está asociado con una menor remoción de material, para el abrasivo a_2 se eligieron intervalos de tiempo de 60, 120 y 240 minutos.

4.3.1 Desarrollo de las pruebas

Como se mencionó anteriormente, en estas pruebas se estudió el efecto que tiene la variación de presión, el uso de diferentes tamaños de abrasivo y el tiempo de lapreado sobre la remoción de material y la rugosidad de la superficie.

Las pruebas se realizaron en dos etapas en forma tal que en la primera se trabajó solamente con alúmina de $5\ \mu\text{m}$ (abrasivo a_1) y en la segunda con alúmina de $1\ \mu\text{m}$ (abrasivo a_2). De este modo, en cada una de las etapas se trabajó con los tres períodos de tiempo designados (τ_1 , τ_2 y τ_3) para cada tamaño de abrasivo, y a la vez para cada uno de los tiempos se lapearon 3 probetas por cada uno de los tres valores de presión determinados (P_1 , P_2 y P_3), por lo que en cada uno de los anillos se utilizó la combinación de discos asociada con estos valores de presión y equivalente para 3 probetas. Por lo tanto, en cada etapa se tienen nueve eventos o experimentos distintos (1 clase de abrasivo $\times$ 3 períodos de tiempo $\times$ 3 valores de presión). Debe señalarse que en ambas etapas se utilizaron probetas bajo las mismas condiciones, es decir, se trabajaron después de ser rectificadas.

4.3.2 Resultados de la remoción de material

Para determinar la cantidad de material removido, primeramente se marcaron las probetas para tener un mejor control y así se pesó cada probeta antes y después de ser lapeadas. De esta forma, el resultado final de la remoción de material asociado con cada evento se obtuvo al hacer un promedio de la cantidad que se removió de las tres probetas que se emplearon para cada experimento.

En la gráfica 4.4 se presentan los resultados que se obtuvieron para la cantidad de material removido para cada una de las 9 combinaciones asociadas con el tamaño de grano a_1 .

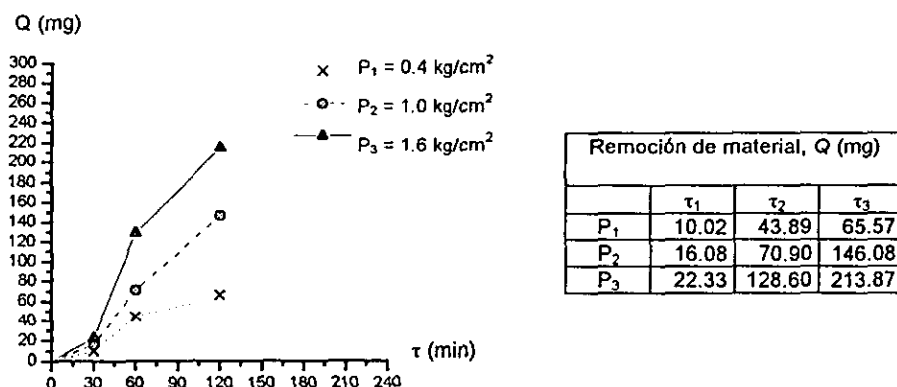


Fig. 4.4 Efecto de la variación de presión (p) y del tiempo de lapeado (τ) sobre la remoción de material (Q); para alúmina blanca de $5 \mu\text{m}$.

De la gráfica anterior se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- De modo general se puede observar que la remoción de material se incrementa conforme transcurre el tiempo.

- Para un mismo intervalo de tiempo, se tiene que la presión más alta (p_3) está relacionada con la mayor cantidad de material removido.
- Así mismo se puede observar que para después de un lapso de tiempo, la proporción entre el material removido y el tiempo tiende a disminuir, lo cual es más notorio para los rangos de presión p_1 y p_3 . De esto se puede suponer que llega un momento en que la remoción de material tiende a ser constante.

En la gráfica 4.5 se presentan los datos referentes a la remoción de material para cada uno de los nueve experimentos correspondientes al tamaño de abrasivo a_2 .

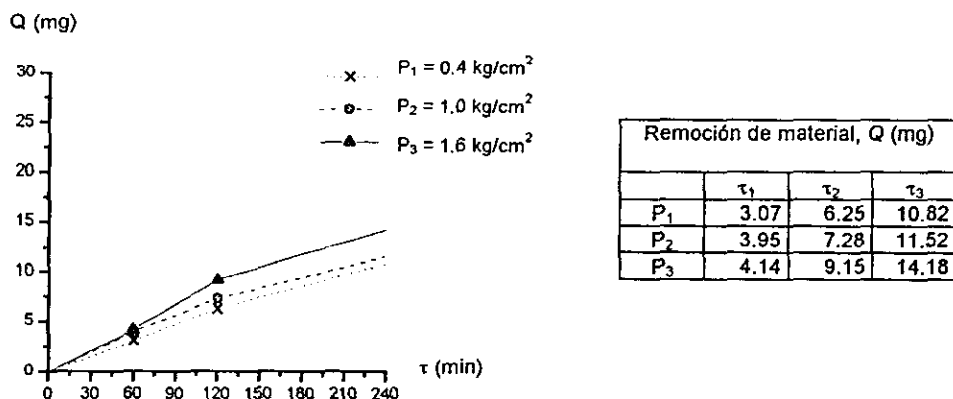


Fig. 4.5 Efecto de la variación de presión (p) y del tiempo de lapeado (τ) sobre la remoción de material (Q); para alúmina blanca con un tamaño de grano de $1 \mu\text{m}$.

De esta gráfica se puede decir lo siguiente:

- Al igual que en la gráfica 4.4 se observa que la remoción de material se incrementa con el tiempo, y así mismo se tiene que una presión mayor está asociada con un mayor desprendimiento de material para un mismo período de tiempo.

- Al comparar esta gráfica con la 4.4 resulta que un tamaño de abrasivo proporciona una menor remoción de material en un tiempo notablemente mayor; así se observa en la gráfica 4.5 que para el máximo tiempo de lapeado ($\tau_3=240$ min) se tiene una remoción de material entre 10 a 15 mg dependiendo de la presión utilizada, lo cual corresponde a la cantidades de material que se obtuvieron para el tiempo menor ($\tau_1=30$ min) para el abrasivo de $5\mu\text{m}$.
- Se puede concluir que un tamaño de abrasivo menor proporciona un mejor control sobre la remoción de material; así se puede ver en esta gráfica que para una presión constante, la remoción de material y el tiempo de lapeado tienden a comportarse en una forma lineal.

Finalmente, tanto para el abrasivo de $5\mu\text{m}$ como el de $1\mu\text{m}$, para interpretar los resultados de remoción de material (Q) en términos de pérdida de dimensiones (L) es necesario determinar la relación que hay entre la altura ($6.69\text{ mm} = 6690\mu\text{m}$) y la masa inicial promedio (6588.73 mg) de la probetas, de lo cual resulta que se pierde $1.015\mu\text{m}$ por cada mg de masa que se removió.

4.3.3 Resultados de la rugosidad de la superficie

Para determinar la calidad superficial de la pieza asociada con cada experimento se elaboró un análisis de rugosidad a una de las probetas representativas, para lo cual se utilizó un rugosímetro "Surfanalyzer 4000". Este análisis de rugosidad consistió en medir la R_m promedio para tres distintos filtros o "cutoff" de superficie (0.8 , 0.25 , 0.08 mm) los cuales se pueden designar como rangos de resolución del rugosímetro.

En la gráfica 4.6 se muestran los valores de R_m para los tres filtros (*cutoff*) que se obtuvieron para cada uno de los 9 experimentos correspondientes a la primera etapa.

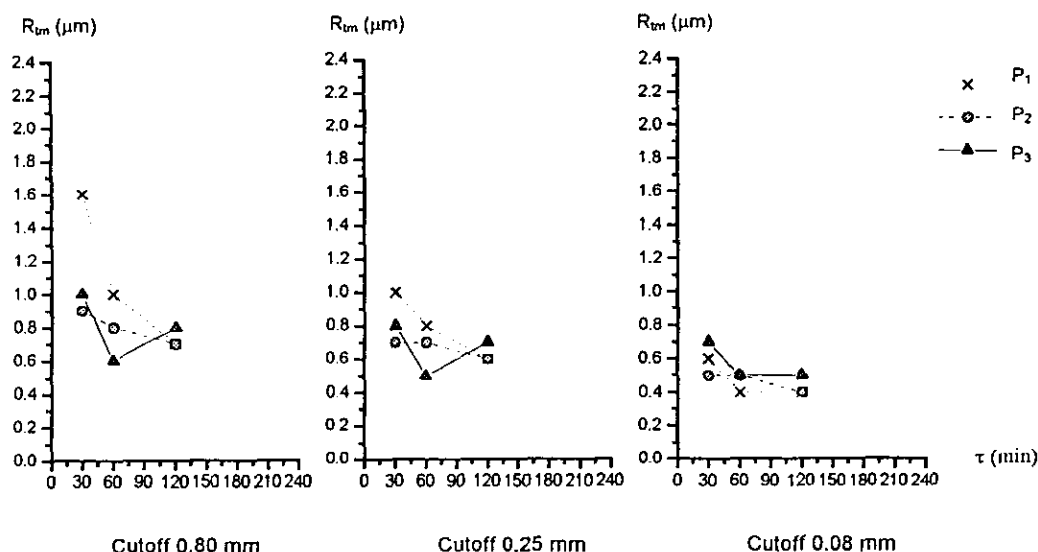


Fig. 4.6 Comportamiento de la presión (p) y el tiempo de lapeado (τ) sobre la calidad superficial de la pieza (R_{tm}); para alúmina blanca con un tamaño de grano de $5 \mu m$.

De esta gráfica se pueden destacar los siguientes aspectos:

- La rugosidad de la superficie tiende a mejorar conforme se incrementa el tiempo de lapeado.
- En un lapso de tiempo corto, se observa que una presión mayor proporciona valores menores de R_{tm} , lo cual indica que las piezas trabajadas a una presión baja aún conservan gran parte de las huellas del maquinado previo.
- Al trabajar con presiones bajas se controla mejor la calidad superficial, lo cual se confirma al comparar el comportamiento de la p_3 y el de p_1 . En el primer caso se observa inicialmente una mejora en la rugosidad y después de un tiempo se incrementa el valor de R_{tm} ; esto indica que después de haberse obtenido una superficie con una buena calidad, posteriormente el exceso de presión ocasiona

que los granos rasguñen la pieza, incrementándose nuevamente la rugosidad. En el otro caso, para la presión p_1 , se tiene que la calidad superficial de la pieza mejora gradualmente conforme pasa el tiempo. En la figura 4.7 se puede observar una comparación visual entre estas dos superficies.

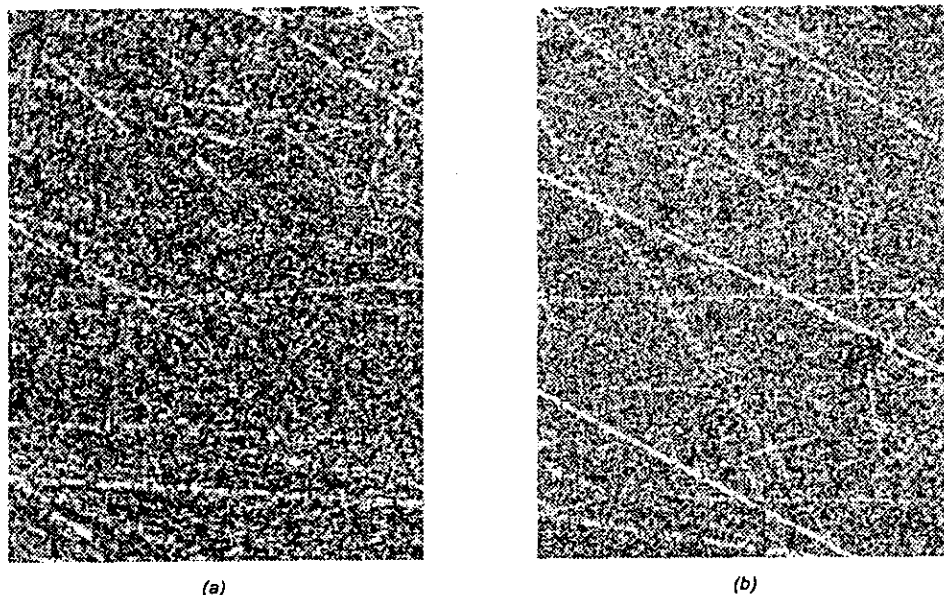


Fig. 4.7 Comparación visual entre dos superficies lapeadas con abrasivo de $5\ \mu\text{m}$ y por un tiempo de 120 min., bajo presiones distintas: (a) $0.4\ \text{kg/cm}^2$ y (b) $1.6\ \text{kg/cm}^2$.

- Por otro lado, se observa que un tamaño de grano particular tiende a proporcionar la misma calidad superficial conforme pasa el tiempo, la cual tiene una R_{pm} de $0.7\text{-}0.6\ \mu\text{m}$ para un "cutoff" de $0.25\ \text{mm}$ y una R_{pm} de $0.5\text{-}0.4\ \mu\text{m}$ para un "cutoff" de $0.08\ \text{mm}$. De acuerdo con las tablas A-5 y A-6 del apéndice B se puede ver que estos valores corresponden a un número de rugosidad de 10, por lo tanto, se puede decir que se ha mejorado la calidad superficial.

En la gráfica 4.8 se muestran los valores de rugosidad asociados a cada uno de los experimentos correspondientes a la segunda etapa.

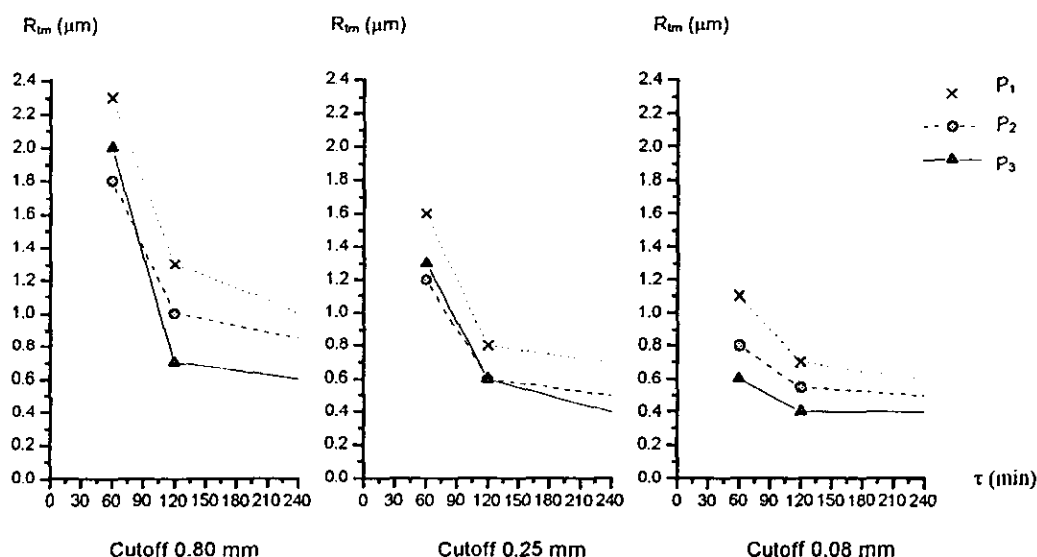


Fig. 4.8 Relación entre la presión (p) y la calidad superficial de la pieza (R_m), para diferentes tiempos de lapeado (τ); para alúmina blanca con un tamaño de grano de $1\mu m$.

De esta gráfica se puede decir lo siguiente:

- Al igual que los resultados obtenidos para el abrasivo de $5\mu m$, se tiene que la rugosidad de la superficie tiende a mejorar con el tiempo.
- Para este tamaño de abrasivo en particular, se tiene que la presión más alta (p_3) es la que proporciona una superficie de mejor calidad; así se observa que para presiones menores es más difícil eliminar totalmente las marcas del rectificado. En la figura 4.9 se presentan dos superficies lapeadas con $1\mu m$ y en las cuales es muy notable la presencia de las huellas del rectificado.

- Al comparar la gráfica 4.6 y la presente se tiene que un tamaño de grano mayor ofrece una mejor calidad superficial en un tiempo menor.

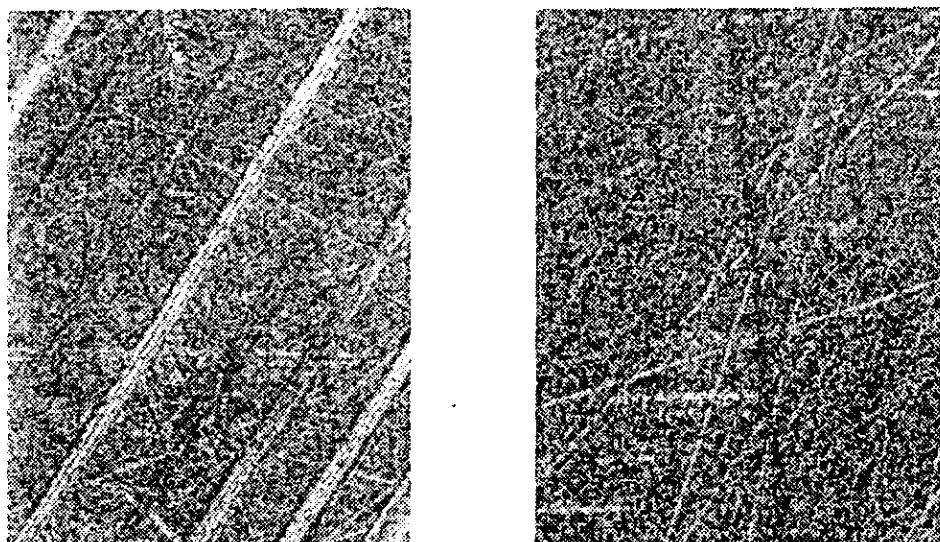


Fig. 4.9 Piezas lapeadas con abrasivo de $1\mu\text{m}$ en las cuales todavía es notable las marcas del rectificado: (izq.) durante un tiempo de 60 min y con un presión de 0.4 kg/cm^2 ; (der.) durante un tiempo de 120 min y con un presión de 1.0 kg/cm^2 .

- Así mismo se observa también que conforme pasa el tiempo, los diferentes valores de presión tienden hacia una calidad superficial similar. Para este caso se tiene que la R_m , mínima fue de $0.4\text{ }\mu\text{m}$ tanto para el "cutoff" de 0.25 y 0.08 mm , lo cual indicaría que con un mayor de tiempo de lapeado se lograría probablemente obtener números de rugosidad mayores a 10, es decir, que tendrían una R_m menores a $0.4\text{ }\mu\text{m}$.

4.3.4 Interrelación entre los resultados de remoción de material y los de la rugosidad de la superficie

Una vez que se analizaron en forma independiente los resultados relacionados con la remoción de material y los de la calidad superficial, conviene relacionarlos entre sí para obtener las condiciones óptimas de lapeado para cada tamaño de abrasivo. De este modo se tiene lo siguiente:

- Al observar las gráficas 4.4 y 4.6 correspondientes al abrasivo de $5\text{ }\mu\text{m}$, se observa que con la presión menor ($p_1 = 0.4\text{ kg/cm}^2$) junto con el tiempo mayor ($\tau_3 = 120\text{ min}$) se tienen las mejores condiciones de lapeado; es decir, proporciona una remoción de material tolerada (menor a $130\text{ }\mu\text{m}$, como se señala en el punto 1.2.9) y a la vez ofrecen una disminución gradual de la rugosidad.
- En cuanto a las gráficas 4.5 y 4.8 correspondientes al abrasivo de $1\text{ }\mu\text{m}$, se tiene que la presión mayor ($p_3 = 1.6\text{ kg/cm}^2$) en combinación del mayor tiempo de lapeado ($\tau_3 = 240\text{ min}$) ofrece la mejor calidad superficial y una remoción de material óptima (entre 20 y $30\text{ }\mu\text{m}$, como se señala en el punto 1.2.9).

Es importante observar que con ambos tamaños de abrasivo se obtuvieron valores muy próximos de rugosidad (R_{vm}). Así mismo se tiene que no se logró alcanzar números de rugosidad (13 y 14) que indicaran un lapeado de muy alta calidad, por lo que se planteó que convendría estudiar el lapeado de piezas en forma gradual, es decir, trabajando superficies primeramente con un tamaño de abrasivo mayor y consecutivamente utilizando tamaños de grano menores.

Dicho lo anterior, se aplicó una nueva prueba que consistió en lapear probetas primeramente con un abrasivo de $5\text{ }\mu\text{m}$ y después con uno de $1\text{ }\mu\text{m}$. Para el primer paso se optó por trabajar con las condiciones óptimas que se encontraron: una presión de 0.4 kg/cm^2 y un tiempo de 120 min ; para el segundo abrasivo,

considerando que se tiene una superficie de mejor calidad, se decidió mantener las mismas condiciones. Para esta prueba se trabajaron probetas con las mismas características que las de las pruebas previas, y así mismo se conservó los valores de la velocidad del pulidor, de la concentración de la mezcla y de los intervalos de alimentación de ésta. En la tablas 4.1 y 4.2 se presentan los análisis de rugosidad realizados a una muestra representativa para cada paso:

OPERATOR	PART/PROCESS	DATE	OPERATOR	PART/PROCESS
TEST CONDITIONS				
CUTOFF = 0.25 MM				
DRIVE SPEED = 0.25 MM/SEC				
SAMPLE LENGTH = 1				
TRAVERSE LENGTH = 5.40 MM				
UNITS = METRIC				
POLARITY = NORMAL				
PARAMETER	MAXIMUM	AVERAGE	MINIMUM	UNITS
RA	0.0	0.0	0.0	UM
RQ	0.1	0.1	0.1	UM
RY	0.9	0.6	0.4	UM
RZ	0.6	0.4	0.4	UM
FEDERAL PRODUCTS CORP., PROVIDENCE, RHODE ISLAND, U.S.A.				

(a)

OPERATOR	PART/PROCESS	DATE	OPERATOR	PART/PROCESS
TEST CONDITIONS				
CUTOFF = 0.08 MM				
DRIVE SPEED = 0.25 MM/SEC				
SAMPLE LENGTH = 1				
TRAVERSE LENGTH = 5.40 MM				
UNITS = METRIC				
POLARITY = NORMAL				
PARAMETER	MAXIMUM	AVERAGE	MINIMUM	UNITS
RA	0.1	0.0	0.0	UM
RQ	0.1	0.1	0.0	UM
RY	0.9	0.4	0.1	UM
RZ	0.4	0.3	0.1	UM
FEDERAL PRODUCTS CORP., PROVIDENCE, RHODE ISLAND, U.S.A.				

(b)

Tabla 4.1 Análisis de rugosidad de una superficie lapeada con un tamaño de grano de 5 μm , para un "cutoff" de (a) 0.25 mm y (b) 0.08 mm.

PART/PROCESS		DATE	OPERATOR	PART/PROCESS			
TEST CONDITIONS		PARAMETER		MAXIMUM	AVERAGE	MINIMUM	UNITS
CUTOFF = 0.25 MM		RA		0.0	0.0	0.0	UM
DRIVE SPEED = 0.25 MM/SEC		RQ		0.1	0.0	0.0	UM
SAMPLE LENGTH = 1		RY		0.4	0.1	0.1	UM
TRAVERSE LENGTH = 6.90 MM		RZ		0.3	0.1	0.1	UM
UNITS = METRIC							
POLARITY = NORMAL							
FEDERAL PRODUCTS CORP., PROVIDENCE, RHODE ISLAND, U.S.A.		CHART NO. OCH-01013		FEDERAL PRODUCTS CORP., PROVIDENCE, RHODE ISLAND, U.S.A.		CHART NO. OCH-01013	

(a)

PART/PROCESS		DATE	OPERATOR	PART/PROCESS				
FEDERAL PRODUCTS CORP. PROVIDENCE, R.I. 02870	RECORD NUMBER	TEST CONDITIONS		PARAMETER	MAXIMUM	AVERAGE	MINIMUM	UNITS
	1	CUTOFF	= 0.08 MM	RA	0.0	0.0	0.0	UM
	2	DRIVE SPEED	= 0.25 MM/SEC	RQ	0.1	0.0	0.0	UM
	3	SAMPLE LENGTH	= 1	RY	0.4	0.1	0.0	UM
	4	TRAVERSE LENGTH	= 7.25 MM	RZ	0.1	0.1	0.0	UM
	5	UNITS	= METRIC					
	6	POLARITY	= NORMAL					
	7							
FEDERAL PRODUCTS CORP., PROVIDENCE, RHODE ISLAND, U.S.A.		CHART NO. OCH-01013		FEDERAL PRODUCTS CORP., PROVIDENCE, RHODE ISLAND, U.S.A.		CHART NO. OCH-01013		

(b)

Tabla 4.2 Análisis de rugosidad de una superficie lapeada primeramente con abrasivo de $5\ \mu\text{m}$ y después con $1\ \mu\text{m}$, para un "cutoff" de (a) 0.25 mm y (b) 0.08 mm.

De las tablas anteriores se observa que para el primer paso se obtuvo valores de R_{m} que coinciden con los de las pruebas previamente realizadas. En cambio, los resultados obtenidos para el segundo paso de esta prueba señalan que los valores de rugosidad son inferiores a los que se obtuvieron en las primeras pruebas; así se puede observar que tanto para el "cutoff" de 0.25 mm como para el de 0.08 mm se obtuvo una R_{m} promedio de 0.1 mm, lo cual indica que se alcanzó un número de rugosidad de 13 de acuerdo con las tablas A-5 y A-6 del apéndice A. Por lo tanto se

puede concluir que se obtiene un lapeado de alta calidad cuando éste es realizado en etapas, utilizando para cada uno de ellos un tamaño de grano.

En la figura 4.10 se muestra el aspecto de la superficie en las diferentes etapas para un lapeado con diferentes tamaños de grano.

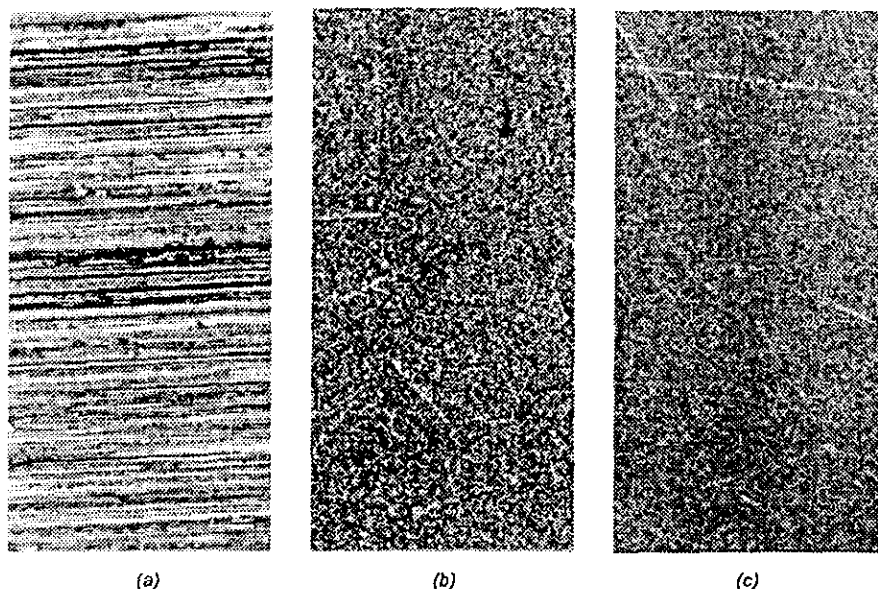


Fig. 4.10 Aspecto visual de una superficie en distintas etapas: (a) rectificada, (b) lapeada con abrasivo de $5\ \mu\text{m}$, y (c) lapeada con abrasivo de $1\ \mu\text{m}$.

4.4 PRUEBAS PARA VALORAR LA INFLUENCIA DEL COJINETE NEUMÁTICO EN EL PROCESO DE LAPEADO

El objetivo de estas pruebas es determinar cómo influye el cojinete neumático de la MALCON sobre los resultados de lapeado; en otras palabras, con la aplicación de estas pruebas se pretende determinar si hay alguna diferencia (ventaja o

desventaja) entre una máquina lapeadora convencional y el prototipo en cuestión. Por tal motivo, en estas pruebas fue necesario acoplar rigidamente el plato de lapeado con el sistema motriz, para lo cual se diseñó y fabricó un nuevo sistema de acoplamiento (Ver la figura 4.11). Este sistema consta de tres elementos: una flecha de transmisión la cual tiene en uno de sus extremos un disco sobre el cual se fija el plato; un buje en el cual se montó en uno de sus extremos un rodamiento de bolas autoalineable y en el otro uno de carga axial y autoalineable, de modo que la flecha pasa a través de estos y su disco es soportado por el rodamiento axial; y un cople similar al del arreglo original que une el extremo de la flecha de transmisión con la flecha del motorreductor.

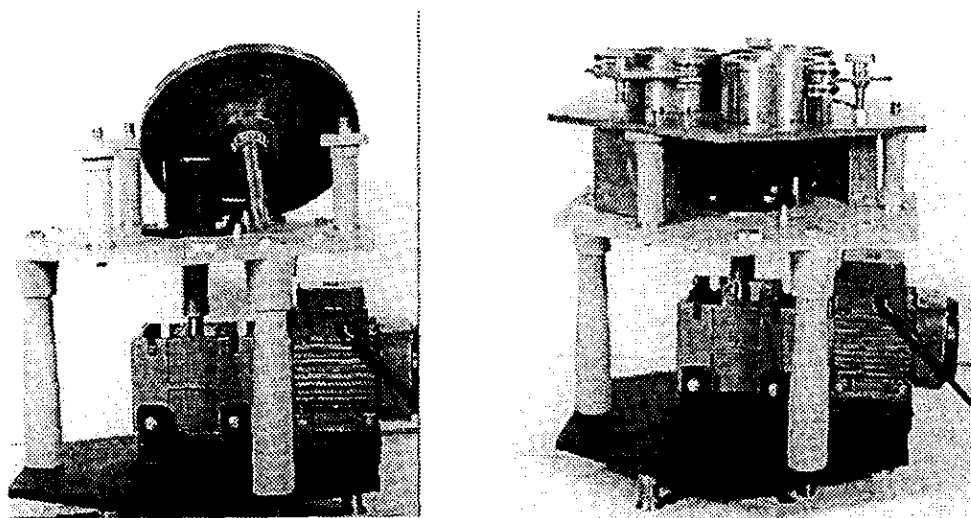


Fig. 4.11 Imágenes del sistema de acoplamiento rígido de la MALCON.

Se midió la rugosidad de la superficie y la planicidad de una probeta lapeada con la aplicación del cojinete neumático y sin éste. Estas probetas son anillos de acero 4140 templado con una dureza promedio de 46 H_{RC} y con las siguientes dimensiones: ϕ , 88.9 mm (3 1/2"), ϕ , 38.1 mm y una altura de 19.05 mm (3/4"). Para tener un punto de comparación más preciso, se trabajó con probetas rectificadas

con la misma calidad superficial. En la figura 4.12 se muestra una de las probetas utilizadas en estas pruebas así como el dispositivo que requiere para colocarla dentro del portapiezas.

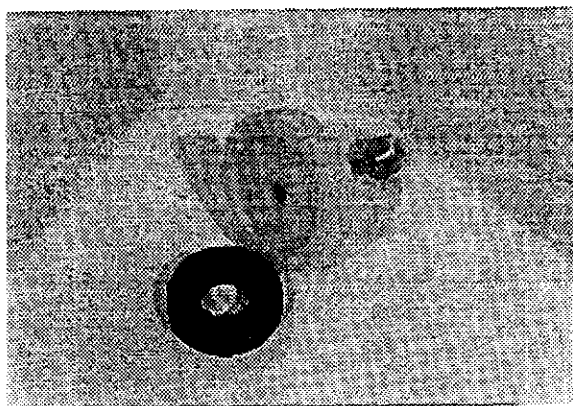


Fig. 4.12 Probeta y su disco de ajuste empleados en las pruebas para valorar la influencia del cojinete neumático sobre el proceso de lapeado.

4.4.1 Prueba para comparar la rugosidad de la superficie

Esta prueba consiste en lapear las probetas primeramente utilizando el sistema de acoplamiento original (con la aplicación del cojinete neumático) entre el pulidor y el sistema motriz (lapeado tipo A), y posteriormente empleando el sistema de acoplamiento rígido antes descrito (lapeado tipo B). En ambos casos se lapearon las probetas durante un tiempo total de 4 horas, teniéndose que por cada período de 30 minutos se hizo un análisis de rugosidad de la superficie de la probeta y así mismo se limpió la superficie del plato con el objeto de retirar las partículas metálicas que se desprenden de la pieza por la acción abrasiva. En la tabla 4.3 se muestran los resultados de los análisis de rugosidad que se obtuvieron para ambos tipos de lapeado.

Tiempo de lapeado	Tipo de lapeado	cutoff = 0.25 mm						cutoff = 0.08 mm					
		R_a (μm)		R_y (μm)		R_z (μm)		R_a (μm)		R_y (μm)		R_z (μm)	
		x5	x1	x5	x1	x5	x1	x5	x1	x5	x1	x5	x1
τ_1 (30 min)	A	0.1	0.1	1.8	1.5	1.5	1.1	0.1	0.1	1.5	1.0	1.2	0.6
	B	0.2	0.2	2.3	2.0	1.6	1.3	0.2	0.2	1.5	1.3	1.3	0.7
τ_2 (60 min)	A	0.1	0.1	1.5	1.3	1.4	0.9	0.1	0.1	1.2	1.0	1.2	0.6
	B	0.2	0.2	2.1	1.5	1.6	1.2	0.1	0.1	1.5	1.2	1.2	0.7
τ_3 (90 min)	A	0.1	0.1	1.6	1.2	1.2	1.0	0.1	0.1	1.3	1.0	1.1	0.6
	B	0.1	0.1	1.8	1.3	1.5	1.0	0.1	0.1	1.3	1.2	1.2	0.6
τ_4 (120 min)	A	0.1	0.1	1.8	1.1	1.1	0.9	0.1	0.1	1.3	1.0	1.0	0.6
	B	0.1	0.1	1.6	1.2	1.3	0.9	0.1	0.1	1.5	1.0	1.1	0.6
τ_5 (150 min)	A	0.1	0.1	1.6	1.2	1.5	0.9	0.1	0.1	1.2	1.0	1.0	0.6
	B	0.1	0.1	1.5	1.2	1.3	0.9	0.1	0.1	1.3	0.9	1.0	0.6
τ_6 (180 min)	A	0.1	0.1	1.6	1.2	1.1	0.9	0.1	0.1	1.2	1.0	0.9	0.6
	B	0.1	0.1	1.8	1.3	1.5	1.0	0.1	0.1	1.5	1.0	1.1	0.6
τ_7 (210 min)	A	0.1	0.1	1.4	1.1	1.0	0.9	0.1	0.1	1.2	0.9	0.9	0.6
	B	0.1	0.1	1.6	1.2	1.3	0.9	0.1	0.1	1.3	1.0	1.0	0.6
τ_8 (240 min)	A	0.1	0.1	1.3	1.1	1.0	0.9	0.1	0.1	1.2	0.9	0.9	0.4
	B	0.1	0.1	1.5	1.2	1.2	0.9	0.1	0.1	1.3	0.9	1.0	0.6

Tabla 4.3 Análisis de rugosidad de superficies lapeadas con la aplicación del cojinete neumático (lapeado tipo A) y sin la aplicación de este elemento (lapeado tipo B).

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla 4.3, se puede observar que el lapeado asociado con el uso de un cojinete neumático (tipo A) ofrece mejores resultados que el lapeado que se empleó el acoplamiento rígido entre el plato y el pulidor (tipo B). Lo anterior resulta más evidente en los primeros tiempos, y de modo similar es más notable la diferencia entre los valores relacionados con el parámetro R_y . Por lo tanto se puede concluir que la aplicación del cojinete neumático en una máquina lapeadora puede permitir mejorar la calidad de una superficie en un menor tiempo.

4.4.2 Aplicación de pruebas para comparar la planicidad

Esta prueba consistió en medir la planicidad de la superficie de una de las probetas representativas para cada tipo de lapeado (A y B), para lo cual se utilizó una máquina de medición de coordenadas Zeiss MC 850. De este modo, en cada una de las piezas se marcó una malla de puntos (separados entre sí cada 10 mm), y se procedió al palpado de estos. De acuerdo con el programa de la MMC para el análisis de superficies, en la tabla 4.4 se presentan los resultados que se obtuvieron:

Superficie	Desviación angular		Levantamiento topográfico				
			#puntos	desviación estándar (S)	punto mínimo	punto máximo	distancia máxima
TIPO A	X/Z (A_1)	0.0056°	32	1.1 μm	-1.5 μm	2.0 μm	3.5 μm
	Y/Z (A_2)	-0.0023°					
TIPO B	X/Z (A_1)	0.0051°	32	1.2 μm	-1.6 μm	2.2 μm	3.8 μm
	Y/Z (A_2)	0.0072°					

Tabla 4.4 Análisis de planicidad de superficies lapeadas con la aplicación del cojinete neumático (lapeado tipo A) y sin la aplicación de este elemento (lapeado tipo B).

De la tabla anterior se tiene que para el lapeado de tipo A (asociado con el uso del cojinete neumático), la lectura tomada de la distancia entre el punto máximo y el punto mínimo es ligeramente menor que la lectura correspondiente al lapeado tipo B (uso de acoplamiento rígido). Así mismo se puede observar que la desviación estándar relacionada con el lapeado tipo A es menor que la asociada con el lapeado de tipo B; de este modo, recordando el concepto de la desviación estándar, se tendría que los puntos palpados están menos dispersos entre sí en el lapeado tipo A que en el tipo B. Por lo tanto, se podría decir que el empleo del cojinete neumático en el proceso de lapeado permite también la obtención de una superficie más plana.

4.5 INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA EN LAS PRUEBAS

En las pruebas realizadas se utilizaron diferentes equipos e instrumentos de medición, los cuales se mencionan a continuación:

- Variador de frecuencia digital marca LANCER modelo GPD 502
- Regulador con manómetro integrado marca Metron con rango de 0-7 kg/cm² con resolución de 0.1 kg/cm².
- Calibrador de alturas electrónico marca Federal Electronics modelo EHE-1056 con transductor Federal Electronic modelo 432 y rango de ± 200 μm con resolución de hasta 0.1 μm .
- Muffa marca Lindberg con rango de 100 a 1100°C y resolución de 5°C.
- Limpiador ultrasónico marca Branson, modelo B-52

- Durómetro H Wilson/Rockwell Series 1500, con resolución de 1 H_{RC} para escala Rockwell C.
- Balanza para laboratorio marca OHAUS modelo 1900, con capacidad de 5 kg y resolución de 0.5 g.
- Balanza digital marca Sartorius Research modelo R160p con capacidad de 160 g y resolución de 1×10^{-5} g.
- Rugosímetro marca Federal Products Co. modelo Surfanalyzer 4000 con rango de magnificación de 0 a 50 μm y resolución de 0.1 μm .
- Máquina de medición por coordenadas marca Zeiss modelo MC 850.

CONCLUSIONES

En esta tesis se presentó el diseño del prototipo de una máquina lapeadora que tiene como innovación el incorporar un cojinete neumático para soportar el pulidor o plato de lapeado, con lo cual se pretendió mejorar la exactitud del acabado superficial (rugosidad y planicidad) de superficies lapeadas respecto con el que podrían proporcionar otras máquinas convencionales, es decir, que emplean un acoplamiento rígido entre el plato y el sistema motriz. Por lo tanto el objetivo principal de esta tesis fue valorar la influencia del cojinete neumático en el proceso de lapeado.

Para determinar el funcionamiento del prototipo desarrollado, "MALCON", se aplicaron diferentes pruebas. Los resultados de las pruebas para estudiar el funcionamiento del cojinete neumático indican que el espesor de la película de aire está dentro de los valores comunes para un funcionamiento eficiente de este tipo de dispositivos; así mismo se tiene que el cojinete de la "MALCON" puede soportar sin ningún problema el peso de los elementos que son utilizados para realizar el lapeado; de igual modo, el número y la colocación de las espreas aseguran la formación de una película de aire uniforme asociada con una mejor estabilidad de la parte dinámica del cojinete. Por lo tanto, se concluye que el diseño de este elemento resulta adecuado para trabajar en las condiciones de operación deseadas.

En cuanto a las pruebas para determinar el comportamiento de los parámetros de lapeado, se puede decir que el prototipo de la "MALCON" cumple con su objetivo, el lapear piezas. Así se puede observar que, de acuerdo con los resultados obtenidos, las probetas que fueron lapeadas presentan valores de rugosidad y de remoción de material característicos del proceso de lapeado.

Por otra parte, las pruebas de mayor importancia en esta tesis fueron las que se aplicaron para valorar la influencia del cojinete neumático en el proceso de lapeado. En estas pruebas se observó que el empleo del cojinete neumático permite reducir la rugosidad y mejorar la planicidad de la superficie. Así se tiene que estos resultados están asociados con los efectos que se obtienen al utilizar el cojinete neumático, las cuales son: a) Permitir que el elemento dinámico, sobre el cual está asentado el plato, se pueda balancear en un plano horizontal (xy), b) Facilitar la alineación de la flecha motriz en la dirección del eje vertical (z), c) Aislamiento del elemento dinámico de las vibraciones de la estructura rígida de la máquina, por medio de la película de aire, reduciéndose la propagación de éstas hacia la superficie de la pieza de trabajo.

De un modo general se puede decir que los resultados obtenidos a través de las pruebas que se aplicaron al prototipo fueron satisfactorios. Por lo tanto se concluye que el diseño de la "MALCON" funcionó conforme a lo que se pretendía, por lo que se puede decir que la idea de aplicar un cojinete neumático en una máquina lapeadora puede representar algún avance técnico en cuanto a la forma de realizar el lapeado. Así se tiene que los resultados hasta ahora logrados se pueden mejorar al profundizar en los métodos de lapeado, sin olvidar que en este aspecto la experiencia tiene un papel importante.

Por otro lado, se tiene que la capacidad de producción de la "MALCON" se puede mejorar por medio de instrumentar la máquina, para lo cual se recomendaría la

incorporación de un temporizador que permita controlar los tiempos de lapeado y de un sistema que permita el suministro automático de la mezcla abrasiva.

Desde un punto de vista económico, el desarrollo del prototipo realizado tiene un costo total aproximado de \$13,000 USD, de los cuales corresponden \$2,500 USD a materiales, \$4,000 USD por concepto de fabricación, \$5,000 USD correspondientes al costo de ingeniería y un costo de servicios auxiliares por \$1,500 USD. Tomando en cuenta que el desarrollo de un prototipo es de orden mucho mayor a los costos de producción, así se tiene que el costo de \$13,000 USD puede resultar competitivo sobre el costo correspondiente al de una máquina comercial de características similares (entre \$4,000 y \$8,500 UDS). Por lo tanto, a nivel comercial se requiere una etapa de evaluación que permita determinar el costo/beneficio real del prototipo.

Por otro lado, debido a la importancia del proyecto, se han publicado los trabajos [5] y [2] para ser presentados en congresos a nivel nacional e internacional. Así mismo, debe mencionarse que la idea de incorporar un cojinete neumático en una máquina lapeadora despertó el interés de Speedfam Limited, empresa inglesa dedicada a la fabricación y comercialización de equipo de lapeado y pulido. Actualmente, en respuesta a una invitación de la ASPE (American Society of Precision Engineering), se encuentra en proceso un artículo en donde serán expuestos los resultados obtenidos con este equipo.

APENDICE A

DIÁMETRO DEL PLATO ϕ	305 mm (12 ")	381 mm (15 ")	508 mm (20 ")	610 mm (24 ")	700 mm (27 1/2 ")	910 mm (36 ")	1220 mm (48 ")	1422 mm (56 ")	1830 mm (72 ")	2135 mm (84 ")
3 Portapiezas										
ϕ_{cr} [mm]	108	140	190	248	275	368				
ϕ_{cr} [in]	4 1/4	5 1/2	7 1/2	9 3/4	10 13/16	14 1/2				
4 Portapiezas										
ϕ_{cr} [mm]			168	210	240	322	432	530	692	813
ϕ_{cr} [in]			6 5/8	8 1/4	9 7/16	12 11/16	17	20 7/8	27 1/4	32

Tabla A-1 Dimensiones comerciales de los platos y portapiezas, para máquinas lapeadoras para una cara con portapiezas de tipo anillo, (Fuente: [3], pp. 305).

Diám. Plato (mm)	305	381	508	508	610	610	700	700	915	915	1220	1422	1830	2135
No. portapiezas	3	3	3	4	3	4	3	4	3	4	4	4	4	4
Diámetro de la pieza	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
mm	in	(psi)	(psi)	(psi)	(psi)	(psi)	(psi)	(psi)	(psi)	(psi)	(psi)	(psi)	(psi)	(psi)
6.4	1/4	235	330	741	578	1300	920	1541	1174					
7.9	5/16	145	226	452	350	820	580	986	751					
9.5	3/8	100	156	314	244	560	400	685	497					
11.1	7/16	70	115	230	187	410	290	479	365					
13	1/2	55	87	176	137	310	220	367	277	700	560			
14.2	9/16	42	68	139	109	245	170	290	221	550	440			
15.9	5/8	35	56	113	88	195	135	234	178	450	350			
17.5	11/16	28	47	93	65	160	110	194	147	370	295			
19	3/4	23	39	78	55	130	90	163	135	300	245			
20.6	13/16	19	32	60	46	113	80	139	106	250	191			
22.2	7/8	17	28	51	40	90	65	119	82	220	175			
23.8	15/16	14	23	45	35	80	55	104	71	190	150			
25	1	13	21	40	30	70	55	90	62	165	130	235	342	620
32	1 1/4	8	13	25	20	45	32	52	40	105	80	145	242	390
38	1 1/2	5	9	19	14	31	22	36	27	70	55	100	152	270
50	2	2	5	9	7	17	12	20	15	39	31	55	85	145
75	3	1	1	4	3	7	5	9	6	16	13	23	34	60
100	4	1	1	1	1	4	2	5	3	9	7	13	19	34
150	6			1	1	1	1	1	1	4	3	5	8	14
200	8					1	1	1	1	1	1	2	4	8
250	10									1	1	1	2	5
360	14													3
380	15													2
400	16													2
356-660	14-26												1	
430-790	17-31													1

Tabla A-2 Carga requeridas para el lapeado de piezas con distintos diámetros, para máquinas lapeadoras de una cara y con portapiezas en forma de anillo, (Fuente: [3], pp. 305).

Tipo de lapeado	Abrasivo	Vehículo (aceite o grasa)	Plato
Lapeado preliminar	Oxido de aluminio o carburo de silicio (con un número de grano 16(80)-10(120)).	Mezcla abrasiva con una consistencia semilíquida. P.e. Aceite para máquinas con parafina.	Materiales más suaves que la pieza de trabajo: hierro fundido ferrítico, cobre, bronce, plomo.
Lapeado final	Oxido de aluminio, carburo de silicio, carburo de boro, polvo de diamante (con un número de grano menor a 8(150)).	Para acero y hierro fundidos: aceite para máquina y parafina. Para cobre: tallo y vaselina con aditivos de grafito. Para aleaciones ligeras: aceite, parafina	Materiales más duros que la pieza de trabajo: hierro fundido perlítico, acero cromado, acero endurecido y vidrio

Tabla A-3 Selección del plato de lapeado y de la mezcla abrasiva, de acuerdo al tipo de lapeado, (Fuente: [7], pp. 417).

Abrasivo	Características del grano	Tamaño	Aplicaciones típicas
Carburo de silicio	duro y agudo	100, 220, 320, 400	lapeado
Corundum	medio suave	400, 500, 600 700, 800	desbaste de aceros suaves acabado de aceros suaves
Alumina	dura	500, 600, 900 2-10 μm	desbaste de aceros duros, inoxidable acabado de aceros duros
Alumina	medio duro	900 5, 10, 15 μm 1-3 μm	Pulido de aceros duros Pulido de aceros duros Pulido de aceros inoxidables
Alumina	suave	1,2 μm	Pulido
Carburo de silicio	dura y agudo	600, 800, 1000	Desbaste de aceros endurecidos, hierro fundido
Garnet	medio suave	600, 800 10 μm	acabado de latón y bronce pulido de latón y bronce
Emery	medio suave	800	Pulido de acero suaves
Oxido de cromo	medio suave	1 μm	Pulido de acero inoxidable
Oxido ferrico	suave	1 μm	Pulido de aleaciones ligeras
Oxido de cerium	medio duro	1,2 μm	Pulido

Tabla A-4 Características de diferentes abrasivos y sus aplicaciones particulares en el proceso de lapeado, (Fuente: [3], pp. 299).

PROCESOS CON DESPRENEDIMIENTO DE VIRUTA														
Tipo de maquinado	Número de rugosidad													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Cutoff, mm													
cepillado	8			2.5										
fresado liso				8		2.5			0.8					
fresado encontrado				8		2.5			0.8		.25			
torneado ordinario				8		2.5		0.8		.25				
torneado con diamante							0.25		0.08					
PROCESOS ABRASIVOS														
Tipo de maquinado	Número de rugosidad													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Cutoff, mm													
rectificado				2.5		0.8								
bruñido							0.8			2.5				
lapeado manual							0.8		0.25			0.08		
lapeado por máquina					0.25						0.08			
superacabado							0.25			0.08				

Tabla A-5 *Números de rugosidad característicos para diferentes tipos de maquinado y cutoffs, (Fuente: [7], pp. 131).*

# rugosidad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
R_{tm} (μm)	320	160	80	40	20	10	6.3	3.2	1.6	0.8	0.4	0.2	0.1	0.05
R_a (μm)	80	40	20	10	5	2.5	1.25	0.63	0.32	0.16	0.08	0.04	0.02	0.01

Tabla A-6 *Números de rugosidad asociados con el promedio de las irregularidades superficiales R_m y su desviación aritmética R_a , (Fuente: [7], pp. 132).*

APENDICE B

B-1 Determinación de la carga teórica que puede soportar el cojinete neumático de la MALCON.

De acuerdo con Slocum [12], la carga que puede soportar un cojinete neumático de tipo anular y con espreas de caja (*pocketed orifices*), se puede determinar mediante la siguiente expresión:

$$W = AP = 0.26 (A) (\Delta P) \quad \dots(1)$$

Para determinar la carga que puede soportar el cojinete neumático de la "MALCON" se tomaron dos áreas de su elemento estático, una corresponde a la superficie anular ubicada en un plano horizontal y la otra está asociada a la superficie cónica del elemento.

En el cojinete se suministra aire a presión (P_a) a 490 kPa (5 kg/cm²) distribuido uniformemente en el interior del elemento estático, el cual se hace pasar a través de veinticuatro espreas, creando una película que separa a las superficies cónicas de los elementos. Debido a que hay una caída de presión durante el paso de la esprea, la presión de descarga P_p se obtiene suponiendo un proceso isentrópico para fluidos compresibles; de [10] se tiene:

$$P_p = P_o \left[\frac{2}{\gamma + 1} \right]^{\gamma/(\gamma-1)} \quad \dots(2), \quad \text{donde } \gamma = 1.4$$

y por lo tanto:

$$P_p = 490 \times 10^3 \left[\frac{2}{1.4 + 1} \right]^{1.4/(1.4-1)} = 258 \text{ [kPa]}$$

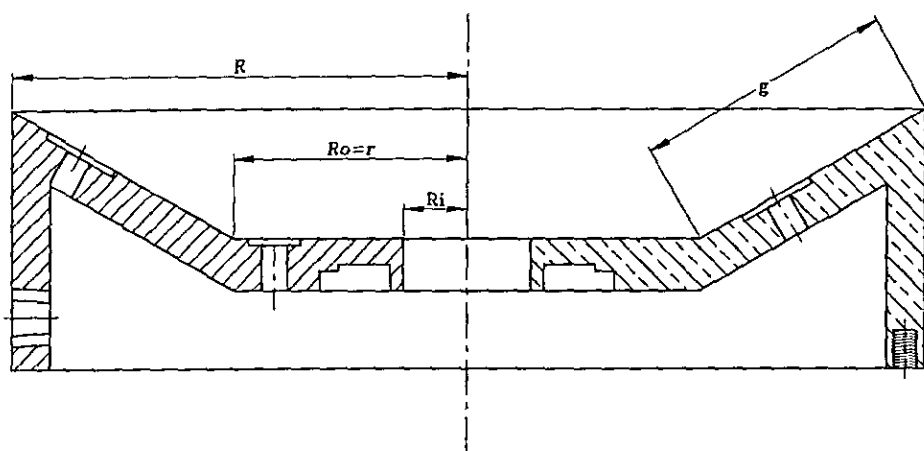


Figura B-1 Dimensiones de las superficies horizontal y cónicas de la pieza cónica de la parte estática.

- Bajo estas condiciones, la carga (W_i) que puede soportar el cojinete a través de la superficie anular horizontal (A_i) se puede calcular de la siguiente forma:

A partir de la ecuación (1) se tiene:

$$W_i = 0.26 [\pi (R_o^2 - R_i^2)] (P_p - P_a) \quad \dots(3)$$

donde: R_o es el radio exterior de la superficie anular, en [mm]; R_i es el radio interior de la superficie anular, en [mm] (Ver figura B-1); P_p es la presión del aire después de pasar por la tobera, en [N/mm²]; P_a es la presión atmosférica, en [N/mm²]. Por lo tanto:

$$W_1 = 0.26 \pi (58^2 - 15.8^2) (0.259 - 0.101) = 401.92 \text{ [N]} = 40.97 \text{ [kgf]}$$

- Por otro lado, la determinación de la carga (W_2) asociada a la superficie cónica del elemento estática se obtuvo de la siguiente manera:

A partir de la ecuación (1) y tomando en cuenta que el área lateral de un cono truncado está dada por $A_2 = 2\pi g(R + r)$ se tiene que:

$$W_2 = 0.26 [2\pi g(R + r)](P_p - P_a) \quad \dots(4)$$

donde: R es el radio de la base del cono, r es el radio de la otra superficie, g es la distancia que hay entre los cuadrantes de las caras (Ver figura B-1); P_p es la presión del aire después de pasar por la esprea, P_a es la presión atmosférica. Por lo tanto:

$$W_2 = 0.26 [2\pi(31.17)(112.7 + 58)](0.259 - 0.101) = 1367.71 \text{ [N]} = 139.42 \text{ [kgf]}$$

Pero recordando que la superficie cónica tiene un ángulo de inclinación de 30° respecto al eje x , entonces se obtiene la componente axial de W_2 :

$$W_{2z} = W_2 \cos 30^\circ = 139.42 \text{ [kgf]} \cos 30^\circ = 120.74 \text{ [kgf]}$$

Por lo tanto la carga total que puede soportar el cojinete neumático es la suma de las cargas asociadas con cada una de las superficies del elemento estático, así se tiene:

$$W = W_1 + W_{2z} = 40.97 + 120.74 = 161.71 \text{ [kgf]}$$

B-2 Determinación de la potencia requerida por el motor

a) Cálculos de los momentos de inercia

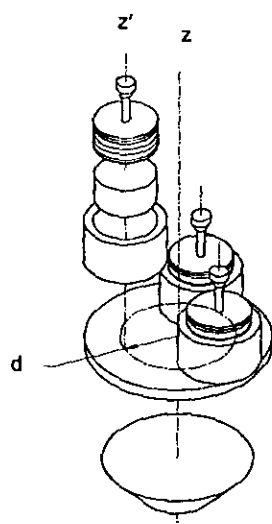


Figura B-2 Diagrama de la ubicación de los elementos que intervienen en el cálculo del momento de inercia necesario para determinar la potencia requerida por el motor.

• Momento de inercia del plato

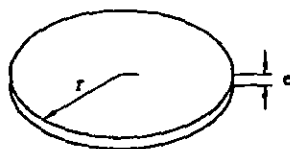
Características: $r=0.153$ m, $e=0.019$ m,

$$V=\pi r^2 e, \rho_{\text{pl}}=7200 \text{ kg/m}^3, k^2=(1/2)r^2$$

$$V_1 = \pi r^2 e = \pi (0.153)^2 (0.019) = 1.4 \times 10^{-3} \text{ [m}^3\text{]}$$

$$m_1 = \rho V = 7200 (1.4 \times 10^{-3}) = 10.08 \text{ [kg]}$$

$$I_{z1} = m k^2 = 10.08 (1/2) (0.153)^2 = 0.121 \text{ [kgm}^2\text{]}$$



- Momento de inercia del elemento dinámico del cojinete neumático

Para calcular el momento de inercia de esta pieza se consideró un cono truncado, es decir, a un cono se le sustrajo otro de menor diámetro.

Primer cono (+)

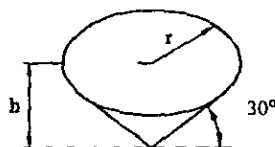
Características: $r=0.124$ m, $h=0.071$ m, $V=(\pi r^2 h)/3$,

$$\rho_{ac} = 7850 \text{ kg/m}^3, k^2 = (3/10) r^2$$

$$V_{cn(+)} = (\pi r^2 h)/3 = \pi(0.124)^2(0.071)/3 = 1.13 \times 10^{-3} \text{ [m}^3\text{]}$$

$$m_{cn(+)} = \rho V = 7850 (1.13 \times 10^{-3}) = 8.87 \text{ [kg]}$$

$$I_{z \text{ cn}(+)} = mk^2 = (8.87) (3/10)(0.124)^2 = 0.041 \text{ [kgm}^2\text{]}$$



Segundo cono (-)

Características: $r=0.058$ m, $h=0.033$ m, $V=(\pi r^2 h)/3$,

$$\rho_{ac} = 7850 \text{ kg/m}^3, k^2 = (3/10) r^2$$

$$V_{cn(-)} = (\pi r^2 h)/3 = \pi(0.058)^2(0.033)/3 = 1.16 \times 10^{-4} \text{ [m}^3\text{]}$$

$$m_{cn(-)} = \rho V = 7850 (1.16 \times 10^{-4}) = 0.91 \text{ [kg]}$$

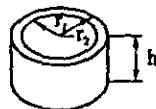
$$I_{z \text{ cn}(-)} = mk^2 = (0.91) (3/10)(0.058)^2 = 9.18 \times 10^{-4} \text{ [kgm}^2\text{]}$$



- Momento de inercia del anillo

Características: $r_1=0.068$ m, $r_2=0.053$ m, $h=0.076$ m,

$$V=\pi h(r_1^2 - r_2^2), \rho_{ac} = 7850 \text{ kg/m}^3, k^2 = (1/2) (r_1^2 + r_2^2)$$



$$V_{\alpha} = \pi h(r_1^2 - r_2^2) = \pi(0.076)(0.068^2 - 0.053^2) = 4.33 \times 10^{-4} \text{ [m}^3\text{]}$$

$$m_{\alpha} = \rho V = 7850 (4.33 \times 10^{-4}) = 3.40 \text{ [kg]}$$

$$I_{z \alpha} = mk^2 + md^2 = (3.40) [(1/2)(0.068^2 + 0.053^2) + (0.095)^2] = 0.043 \text{ [kgm}^2\text{]}$$

- Momento de inercia de los discos de presión

Características: $r=0.053 \text{ m}$, $h=0.0495 \text{ m}$, $V=\pi r^2 h$,

$$\rho_{\text{ac}} = 7850 \text{ kg/m}^3, k^2 = (1/2) r^2$$



$$V_{\text{dp}} = \pi r^2 h = \pi(0.053)^2(0.0495) = 4.36 \times 10^{-4} \text{ [m}^3\text{]}$$

$$m_{\text{dp}} = \rho V = 7850 (4.36 \times 10^{-4}) = 3.42 \text{ [kg]}$$

$$I_{z \text{ dp}} = mk^2 + md^2 = 3.42 [(1/2)(0.053^2) + (0.095)^2] = 0.036 \text{ [kgm}^2\text{]}$$

- Momento de inercia de la pieza

Características: $r=0.051 \text{ m}$, $h=0.051 \text{ m}$, $V=\pi r^2 h$,

$$\rho_{\text{ac}} = 7850 \text{ kg/m}^3, k^2 = (1/2) r^2$$



$$V_w = \pi r^2 h = \pi(0.051)^2(0.051) = 4.16 \times 10^{-4} \text{ [m}^3\text{]}$$

$$m_w = \rho V = 7850 (4.16 \times 10^{-4}) = 3.27 \text{ [kg]}$$

$$I_{z w} = mk^2 + md^2 = 3.27 [(1/2)(0.051^2) + (0.095)^2] = 0.033 \text{ [kgm}^2\text{]}$$

- Suma de momentos (Momento de inercia total)

$$I_z = \Sigma I_z = I_{z1} + I_{z \text{ cn}(+)} + I_{z \text{ cn}(-)} + 3(I_{z \alpha}) + 3(I_{z \text{ dp}}) + 3(I_{z w})$$

$$I_z = 0.121 + 0.041 - 9.18 \times 10^{-4} + 3(0.043 + 0.036 + 0.033) = 0.49 \text{ [kgm}^2\text{]} \\ = 0.49 \text{ [Nms}^2\text{]}$$

b) Determinación de la potencia

Para determinar la potencia se requiere obtener el torque o par de torsión asociado con el momento de inercia obtenido. Considerando que el motor presenta una aceleración angular de 0 a 300 rpm en 5 s, se tiene el siguiente par de torsión:

$$T = I_z \cdot \theta = I_z \cdot (\Delta\omega/t) = I_z \cdot (2\pi/60)(\Delta N/t)$$

$$T = 0.049 \text{ [Nms}^2\text{]} \cdot (2\pi/60) (350 - 0) / 5 \text{ [rad/s]} = 3.078 \text{ [Nm]}$$

Una vez obtenido el torque y tomando en cuenta que el motor va a trabajar con una velocidad angular máxima de 300 rpm, finalmente se puede determinar la potencia requerida:

$$\begin{aligned} \text{Pot} = T\omega &= T (2\pi N/60) = 3.078 \text{ [Nm]} \cdot (2\pi/60) (300) \text{ [rad/s]} = 96.72 \text{ [W]} \\ &= 0.13 \text{ [HP]} \end{aligned}$$

REFERENCIAS

1. Amstead Ph., Otswald, F. y Begeman M.L., *Procesos de manufactura-version SI*, (Ed. CECSA, México D.F.), pp. 681-683, 696-698, (1981)
2. Ascanio G., Cava C., Reséndiz R., Chicurel R. y Nava R., "*Rotating Lapping Machine with a Pneumatic Bearing Supported Lap*", Proceedings 1997 ASPE Anual Meeting, (American Society for Precision Engineering, Estados Unidos), (1997)
3. ASM Handbook Comittee, *Metals Handbook*, vol. 3, "Lapping", P. Lynah (American Society for Metals; Ohio, Estados Unidos), pp. 298-310, (1989)
4. Bralia G., *Handbook of product design and manufacturing*, "Honed, Lapped and Superfinished parts", Militzer R.W., (Ed. McGraw Hill, Estados Unidos), pp. 4.169-4.179, (1988)
5. Cava C., Ascanio G., Reséndiz R. y Chicurel R., "*Diseño de una Lapeadora con el plato de pulido acoplado a un Rodamiento Neumático*", XII Congreso SOMI, (Sociedad Mexicana de Instrumentación, México D.F.), (1997)
6. Delgado C., *Diccionario Técnico Normalizado para Herramientas y Máquinas Herramientas*, (Centro de Instrumentos UNAM, México D.F.), (1984)
7. Kackzmarek K., *Principles of machining by cutting, abrasion and erosion*, "Lapping", (Ed. Peter Peregrinus Lt., Warsaw), pp. 413-424, (1979)
8. Lapmaster, *Lapping and polishing Accesories*, Catálogo de productos, (Estados Unidos), (1994)
9. Matsunaga M., *Fundamental studies of lapping*, (Bulletin of Japan Society of Grinding Engineers, Tokio), (1966)
10. Palomino D. y Robles G., *Características Estáticas de un Rodamiento Neumático*, Informe técnico, (Centro de Instrumentos UNAM, México D.F.), pp. 1-7, (1996)

11. Patiño J.M. y Vázquez R., *Diseño de un dinamómetro para determinar el consumo de potencia en tanques agitados*, Tesis de Licenciatura, (Facultad de Ingeniería UNAM, México D.F.), pp. 11-23, 88-94, (1995)
12. Resendíz R., et-al, Chem. Eng. Tech., 14 , "New Pneumatic Bearing Dynamometer for Power Input Measurement Stirred Tanks", (Estados Unidos), pp. 105-108, (1991)
13. Reséndiz R. y Ascanio G., *Dinamómetro con Cojinete Neumático para la Medición del Consumo de Potencia en Tanques Agitados*, Informe técnico, (Centro de Instrumentos UNAM, México D.F.), pp. 1-5, 9-11, (1989)
14. Shey S., *Tribology in Metalworking, friction, lubrication and wear*, (American Society for Metals, Estados Unidos), pp. 657, (1983)
15. Slocum, Alexander H., *Precision Machine Design, "Aerostatic Bearings"*, (Ed. Prentice Hall, Estados Unidos), pp. 580-607, (1992)
16. Stock Drive Products, *Design and Application of Small Standardized Components*, (Educational Products, Canada), pp. 14-20, 330-332, (1980)
17. Surfaces Finishes Co. Inc., *Specialists in micro-precision Lapping*, Información comercial, (Estados Unidos), (1996)
18. Unidad de Investigación y Asistencia Técnica de Materiales, *Mediciones Mecánicas*, (Departamento de Publicaciones de la Facultad de Ingeniería UNAM, México D.F.), pp. 5.1-5.4, (1995)

Direcciones electrónicas

19. *Grinding and lapping compounds*, (Publicado por United States Products Co., Pittsburgh), <http://www.mfginfo.com/mfg/lapvalve/lapartical.htm>, (1995)
20. *What is split lapping ?* , <http://www.pacifier.com/~bgober/splitlap.html>, (1997)